

## МОДЕЛЬ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ВЗЛЕТНО-ПОСАДОЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ НА АЭРОДРОМЕ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЙ НА ПЕРЕСТАНОВКУ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ И ТРЕБУЕМЫХ БЕЗОПАСНЫХ ИНТЕРВАЛОВ

Ю.А. Кибзун, Д.В. Скавинская (Москва)

В последние десятилетия в мире наблюдается рост интенсивности воздушного движения. Это ставит перед мировым сообществом серьезные проблемы, связанные с пропускной способностью воздушного пространства вблизи аэродромов, увеличением задержек воздушных судов и перегрузкой зон ожидания. Это, в свою очередь, приводит к перегрузке диспетчеров управления воздушным движением (УВД) и снижению безопасности полетов.

Одним из наиболее перспективных подходов решения проблем перегрузки воздушного пространства и диспетчеров УВД является разработка систем поддержки диспетчеров при планировании и регулировании прибытия и вылетов на аэродроме. Такие средства получили название Arrival Manager (AMAN) и Departure Manager (DMAN) – менеджеры прибытия и вылета. Первые работы по созданию таких систем начались в 1990-х годах в Европе и США. В настоящее время AMAN/DMAN широко используются в самых загруженных аэропортах мира.

Основная задача AMAN и DMAN заключается в поддержке работы диспетчеров УВД, работающих с прибывающими и вылетающими потоками воздушных судов (ВС), путем предоставления им автоматически вычисленной оптимальной очереди ВС на прибытие и вылет. При этом в системе динамически вычисляется последовательность ВС и времена прибытия, учитывается частота взлетно-посадочных операций (ВПО) на аэродроме, интервалы между ВПО, категория турбулентности ВС и другие параметры и ограничения. Критерием построения оптимальной последовательности является, как правило, минимизация задержек воздушных судов.

### Метод построения оптимальной последовательности

Проблема построения оптимальной последовательности на взлетно-посадочной полосе (ВПП) решается во всем мире многими методами, среди которых: методы теории графов, методы теории расписаний, метаэвристические методы, методы ветвей и границ. Одним из них является метод с ограничениями на перестановку ВС - CPS (Constraint Position Shifting) [1]. Вводится параметр  $k$  – максимально возможное число позиций, на которое ВС может быть сдвинуто в очереди относительно последовательности «первый пришел – первый обслужился» (FCFS – First Come – First Served). Далее строится CPS-граф возможных вариантов последовательностей с учетом ограничений на перестановку, после чего граф обходится с помощью рекуррентного выражения, отвечающего некоторому заданному критерию. В представленной работе задача решалась отдельно для прибывающих и вылетающих ВС с критерием максимизации пропускной способности ВПП и с критерием минимизации максимальной задержки ВС в последовательности.

Задача составления оптимальной последовательности ВС при прибытии и вылете имеет большое количество ограничений, среди которых:

1. Ограничения на перестановку ВС в очереди прибытия (вылета):

$$n \leq k \quad (1)$$

где  $n$  – число позиций, на которое ВС можно сдвинуть в очереди,  $k$  – максимально возможное число позиций, на которое ВС может быть сдвинуто;

2. Ограничения по безопасности (соблюдение минимальных интервалов на ВПП):

$$T^{*}(j) \geq T^{*}(i) + \delta_i(j), \quad (2)$$

где  $T^{*}(i)$  – оптимальное время прибытия (вылета)  $i$ -го ВС, а  $T^{*}(j)$  – оптимальное время прибытия (вылета)  $j$ -го ВС, следующего за  $i$ -м;  $\delta_i(j)$  – минимальный интервал между  $i$ -м и  $j$ -м ВС с учетом их категории турбулентности и направления движения. В таблицах 1 и 2 приведены минимальные безопасные интервалы между посадками и взлетами ВС (в секундах) с учетом категории турбулентности (L – легкий, M – средний, H – тяжелый, J – супер тяжелый);

Таблица 1  
Посадка–Посадка (с)

BC I \ BC II	L	M	H	J
L	60	60	60	60
M	60	60	60	60
H	120	120	120	120
J	180	180	120	120

Таблица 2  
Взлет–Взлет (с)

BC I \ BC II	L	M	H	J
L	60	60	60	60
M	120	60	60	120
H	120	120	120	120
J	180	180	120	120

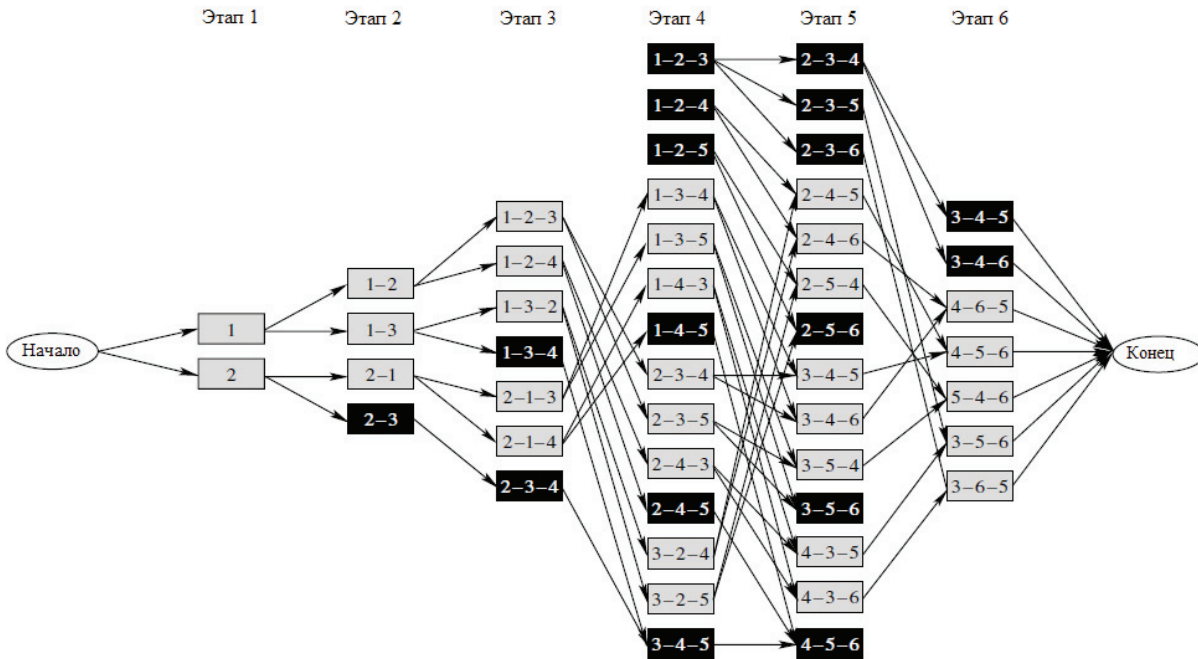
3. Ограничения на возможное время посадки (взлета) ВС:

$$e_i \leq t_i \leq l_i, \quad (3)$$

где  $t_i$  – рассчитанное время прибытия (вылета) ВС, которое должно быть не раньше  $e_i$  – самого раннего возможного времени прибытия (вылета) ВС и не позже  $l_i$  – самого позднего возможного времени прибытия (вылета).

### Построение CPS-графа

На рисунке представлен пример построения CPS-графа для последовательности из шести ВС с ограничением на перестановку ВС  $k=1$ . Каждый этап в графе соответствует позиции ВС в последовательности. Каждый узел в графе на позиции  $i$  представляет собой возможную подпоследовательность длиной  $\min(2k+1, p)$  из ВС, находящихся на позиции  $i$  и нескольких предыдущих позициях в очереди. Каждый элемент подпоследовательности – это ВС с порядковым номером в последовательности FCFS. Последний элемент подпоследовательности соответствует ВС, находящемуся в генерируемой последовательности на позиции  $p$ . Граф строится с помощью нахождения всех возможных последовательностей воздушных судов. При  $k=1$  ВС могут передвигаться в последовательности только на одну позицию вперед или назад, соответственно на первом этапе могут находиться только ВС с номерами 1 и 2 в изначальной последовательности (FCFS), а на втором этапе – ВС с номерами 1, 2 и 3 и т.д. При построении графа вводятся два узла – «начало» и «конец», затем добавляются дуги от узла «начало» ко всем узлам на позиции 1, и из каждого узла на позиции  $n$  к узлу «конец». Дуга  $(i, j)$  строится от узла на позиции  $i$  к узлам на позиции  $p+1$ , если подпоследовательность узла  $j$  может следовать за подпоследовательностью узла  $i$ , т.е. начало подпоследовательности узла  $j$  длиной  $i$  соответствует концу подпоследовательности узла  $i$  длиной  $\min(2k, p)$ .



Граф всех возможных последовательностей ВС (CPS-граф)

**Критерий 1: максимизации пропускной способности ВПП**

В алгоритме максимизации пропускной способности используется динамический обход CPS - графа с использованием рекуррентного выражения (4). Задача сводится к минимизации времени посадки последнего ВС в последовательности.

$$T^*(j) = \max\{e(j), \min_{i \in P(j): T^*(i) \leq l(i)} (T^*(i) + \delta_i(j))\}, \tag{4}$$

где  $T^*(j)$  – оптимальное время прибытия (вылета)  $j$ -го ВС, которое выбирается как максимальное время из  $e(j)$  – самого раннего времени прибытия (вылета) и  $T^*(j)$  – оптимального времени прибытия (вылета) -го ВС с учетом  $\delta_i(j)$  – безопасного интервала между  $i$ -м и  $j$ -м ВС. В свою очередь,  $j$ -е ВС выбирается из возможных предшественников  $i$ -го ВС.

**Критерий 2: минимизации максимальной задержки воздушных судов**

Задача минимизации максимальной задержки ВС сводится к последовательному решению нескольких задач максимизации пропускной способности ВПП. Пусть  $D$  – верхняя граница максимальной задержки по всем ВС, определяющая ограничения на возможное время прибытия (вылета). Первоначально верхняя граница задержки выбирается как наибольшее значение  $l(\cdot)-e(\cdot)$  среди всех ВС, а нижняя граница задержки приравнивается к нулю. Далее решается задача максимизации пропускной способности ВПП с ограничениями на прибытие (вылет) ВС, соответствующими интервалу возможных задержек  $[0; D/2]$ . Если у данной задачи существует решение, то верхняя граница возможной задержки приравнивается к  $D/2$ , т.е. интервал возможной задержки уменьшается до  $[0; D/2]$ . Если при этом решения не существует, то повышается нижняя граница задержки до значения  $D/2$ , а интервал возможной задержки становится равным  $[D/2; D]$ . После этого задача максимизации пропускной способности ВПП решается для нового интервала возможных задержек. Процесс последовательного решения таких задач завершается, если величина интервала возможных задержек становится меньше некоторой заданной величины.

## Моделирование

Модель построения оптимальной последовательности ВПО входит в состав Комплекса имитационного моделирования системы организации Воздушного Движения (КИМ ОрВД) [2]. Работа модели проверялась на специально сформированных сценариях, включающих проектируемую структуру воздушного пространства Московской зоны и потока ВС с разной категорией турбулентности.

Для проведения моделирования использовались 2 сценария:

– сценарий №1: модельный поток, состоящий из 20 ВС, которые прибывают в аэропорт Домодедово. По плану ВС прибывают в аэропорт назначения с нарушением минимальных интервалов на ВПП;

– сценарий №2: модельный поток, состоящий из 20 ВС, которые вылетают из аэропорта Домодедово. По плану ВС вылетают из аэропорта назначения с нарушением минимальных интервалов на ВПП.

### Результаты работы процедуры построения оптимальной очереди

В табл. 3 приведены результаты построения оптимальной очереди для сценария № 1 для стратегии FCFS и двух критериев оптимизации для ограничений на перестановку ВС  $k=1$  и  $k=2$ . Аналогичные результаты для сценария № 2 приведены в табл. 4.

Таблица 3  
Сравнение результатов для сценария №1

Показатель	FCFS	k=1, кр. 1	k=1, кр. 2	k=2, кр. 1	k=2, кр.2
Средняя задержка	0:05:14	0:04:44	0:04:44	0:04:41	0:04:32
Максимальная задержка	0:11:50	0:09:50	0:09:50	0:10:50	0:09:50
Суммарная задержка	1:44:38	1:34:38	1:34:38	1:44:38	1:30:38
Уменьшение ср. задержек	-	9,5%	9,5%	10,5%	13,3%

Таблица 4  
Сравнение результатов для сценария №2

Показатель	FCFS	k=1, кр. 1	k=1, кр. 2	k=2, кр. 1	k=2, кр.2
Средняя задержка	0:07:51	0:05:09	0:05:09	0:04:24	0:04:24
Максимальная задержка	0:16:00	0:11:00	0:11:00	0:10:00	0:10:00
Суммарная задержка	2:37:00	1:43:00	1:43:00	1:28:00	1:28:00
Уменьшение ср. задержек	-	34,4%	34,4%	43,95%	43,95%

Полученные для сценария №1 результаты по сравнению с последовательностью FCFS улучшились. Для критерия 1 минимальное время было получено при  $k=2$ . Это можно объяснить тем, что при  $k=2$  существует большее количество возможных очередей на посадку, где нашлась самая лучшая последовательность ВС. Относительно результатов FCFS средняя задержка в данном случае уменьшилась на 10,5% (33 секунды), максимальная задержка уменьшилась на одну минуту, суммарная задержка не изменилась.

Однако самые лучшие результаты были достигнуты при  $k=2$  и критерии 2. Это можно объяснить тем, что критерий 2 основывается на многократном решении задачи с критерием 1. Средняя задержка в данном случае уменьшилась на 13,3% (42 секунды), максимальная задержка уменьшилась на 2 минуты, суммарная задержка уменьшилась на 14 минут.

Для сценария №2 лучший результат был получен при  $k=2$ , для критерия 1 и 2. Средняя задержка уменьшилась на 43,95% (3 минуты 45 секунды), максимальная задержка уменьшилась на 5 минут, суммарная задержка уменьшилась на 1 час 9 минут.

### Выводы

Проблемы пропускной способности воздушного пространства вблизи крупных аэродромов становятся все актуальнее с возрастанием интенсивности воздушного движения. Один из путей решения проблем пропускной способности рассмотрен в данной работе – это планирование потоков воздушного движения путем построения оптимальной последовательности воздушных судов на взлет и посадку.

На основе метода ограничений на перестановку ВС была разработана модель построения оптимальных последовательностей ВПО. Были рассмотрены критерии: максимизации пропускной способности ВПП и минимизации максимальной задержки всех воздушных судов. Был проведен анализ эффективности работы модели, при котором алгоритм построения оптимальной последовательности сравнивался с методом «первый пришел – первый обслужился». Из результатов анализа можно сделать вывод, что построенная модель позволяет сократить задержки ВС при прибытии (вылете) и увеличить пропускную способность ВПП.

Дальнейшими направлениями работ являются модификация модели для использования нескольких зависимых ВПП на одном аэродроме и модификация модели для использования одной ВПП на одном аэродроме одновременно на прибытие и вылет ВС.

### Литература

1. **Balakrishnan Н., Chandran В.С.** Algorithms for Scheduling Runway Operations Under Constrained Position Shifting // Massachusetts Institute of Technology, Analytics Operations Engineering Inc., USA, 2010.
2. **Вишнякова Л.В., Дегтярев О.В., Попов А.С.** Комплекс имитационного моделирования организации воздушного движения (КИМ ОрВД) // Всеросс. научн.-практ. конф. по имитационному моделированию социально-экономических систем (ВКИМСЭС), М., 2012.