

О.В. НЕЛИН

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ МЕТОД КОРРЕКТИРОВКИ ПЛАНА ПОЛЕТОВ В НЕШТАТНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ АЭРОПОРТА

Введение

Базисом оперативного планирования деятельности всех служб и структурных подразделений аэропорта являются суточные планы полетов (СПП), формируемые на основе расписаний движения воздушных судов авиакомпаний, использующих данный аэропорт. Плановая деятельность аэропорта подвержена многочисленным внешним и внутренним возмущающим воздействиям, вызывающим разнообразные нештатные (сбойные, кризисные) ситуации, когда выполнение суточного плана полетов оказывается невозможным. Это, в свою очередь, приводит к неудобствам потребителей авиатранспортных услуг, прямым и косвенным экономическим потерям всех участников авиатранспортного процесса: аэропорта, авиакомпаний, служб управления воздушным движением. Одним из средств стабилизации состояния аэропорта и снижения финансовых потерь служит внедрение в практику управления математических методов принятия оперативных решений в кризисных ситуациях. Этим обусловлена актуальность предлагаемой разработки.

Факторы возникновения нештатных ситуаций в аэропорту принято классифицировать следующим образом:

- авария воздушного судна в аэродромной зоне;
- неисправности аэродромного оборудования и сооружений (отказы навигационного оборудования, светотехнических средств, происшествия на взлетно-посадочной полосе, обледенение ВПП, рулежных дорожек, перронов и т.п.);
- дефицит аэродромных ресурсов, необходимых для подготовки и выполнения рейса (нехватка авиационного топлива в топливозаправочных баках, недостаточное количество исправных единиц наземного спецтранспорта, погрузочно-разгрузочной техники);
- изменение технологий предполетного, послеполетного обслуживания рейсов (вызванные, например, необходимостью выполнения антиобледенительных мероприятий, проведения дополнительного контроля пассажиров, грузов, воздушного судна);
- возникновение экстренных ситуаций при регистрации, посадке, высадке пассажиров, загрузке и выгрузке грузов и багажа;
- возникновение чрезвычайных ситуаций, связанных с опасностью для пассажиров и воздушных судов;
- несвоевременное выполнение персоналом предполетных, послеполетных технологических операций;
- неблагоприятные погодные условия в зоне аэропорта и на воздушных трассах;
- введение ограничений на использование технологических ресурсов аэропорта (временное закрытие взлетно-посадочной полосы для взлетов/посадок воздушных судов, ограничение частоты взлетов/посадок, ограничение продолжительности интервалов времени между взлетами/посадками, ограничение на типы принимаемых/выпускаемых воздушных судов и др.).

Возникновение нештатной ситуации требует оперативной корректировки первоначального суточного плана полетов. При этом должны преследоваться цели максимального сокращения сроков действия нештатной ситуации, минимизации экономических потерь авиакомпаний, обусловленных задержкой рейсов, и затрат, связанных с возвращением аэропорта в штатный режим функционирования. Изменения, вносимые в суточный план полетов, должны касаться только тех рейсов, выполнение которых в установленные

расписанием сроки оказывается принципиально невозможным. Временные параметры прочих рейсов, проходящих через данный аэропорт, должны оставаться неизменными. Это означает, что при корректировке суточного плана полетов необходимо учитывать наличие некоторого множества отрезков времени, запрещенных для взлетов воздушных судов из рассматриваемого аэропорта. Предполагается, что эти отрезки уже «заняты»:

а) взлетами самолетов, выполняющих рейсы, которых не должны касаться изменения в суточном плане полетов;

б) посадками воздушных судов, выполняющих рейсы из других аэропортов (согласно расписанию и с отклонениями от него).

С учетом вышеизложенного задача оперативной корректировки суточного плана полетов заключается в определении моментов времени вылета из данного аэропорта скопившихся в нем воздушных судов при соблюдении всех технологических правил и накладываемых ограничений. Задача решается отдельно для каждого аэропорта и последовательно для всех аэропортов, охваченных нештатной ситуацией. При этом очередность аэропортов должна устанавливаться вышестоящим (по отношению к аэропортам) органом авиационной администрации, исходя из категорий аэропортов и специфики сложившейся кризисной ситуации.

Задача оперативной корректировки суточного плана полетов носит многовариантный и, следовательно, оптимизационный характер. Исходными данными для ее решения служат следующие множества и величины:

J – множество скопившихся в аэропорту воздушных судов, для которых необходимо назначить время вылета;

$t_j^{(1)}$ – наиболее ранний момент времени начала предполетной подготовки j -го воздушного судна, $j \in J$;

$t_j^{(2)}$ – наиболее поздний срок вылета j -го воздушного судна из аэропорта (задаваемый, исходя из планов дальнейшего использования данного воздушного судна), $j \in J$;

p_j – нормативная продолжительность предполетного обслуживания j -го воздушного судна, $j \in J$;

τ_j – минимальный допустимый интервал времени между взлетом j -го и любого другого воздушного судна, $j \in J$;

c_j – финансовые потери, вызванные непроизводительным простоем j -го воздушного судна в ожидании вылета за единицу времени, $j \in J$;

m – количество отрезков времени в рассматриваемом периоде, запрещенных для взлетов воздушных судов из данного аэропорта;

a_i и b_i – нижняя и верхняя границы i -го отрезка времени, запрещенного для взлетов воздушных судов из аэропорта, $i = \overline{1, m}$.

Время взлета каждого j -го воздушного судна функционально зависит от продолжительности ожидания данного события с момента потенциальной готовности воздушного судна к вылету. Поэтому величины указанной продолжительности, сопоставленные множеству воздушных судов, целесообразно выбрать в качестве искомым переменных x_j , $j \in J$. Тогда момент t_j взлета j -го воздушного судна из аэропорта будет определяться формулой

$$t_j = t_j^{(1)} + p_j + x_j, \quad (1)$$

где $x_i \geq 0$; $j \in J$.

В систему ограничений задачи оперативной корректировки суточного плана полетов входят математические соотношения, отражающие следующие требования:

- момент взлета каждого воздушного судна не должен принадлежать ни одному из запрещенных отрезков времени:

$$\left| t_j - \frac{1}{2}(a_i + b_i) \right| \geq \frac{1}{2}(b_i - a_i); \quad i = \overline{1, m}; \quad j \in J; \quad (2)$$

- рассогласование во времени между взлетами двух любых воздушных судов не должно быть меньше допустимого интервала:

$$|t_{j_1} - t_{j_2}| \geq \frac{1}{2}(\tau_{j_1} + \tau_{j_2}); \quad j_1 \in J; \quad j_2 \in J \setminus \{j_1\}; \quad (3)$$

- назначенный момент взлета каждого воздушного судна не должен предшествовать моменту его потенциальной готовности к вылету:

$$t_j \geq t_j^{(1)} + p_j; \quad j \in J; \quad (4)$$

- взлет каждого воздушного судна должен быть осуществлен не позднее заданного крайнего срока:

$$t_j \leq t_j^{(2)}; \quad j \in J. \quad (5)$$

Критериями оптимальности корректируемого суточного плана полетов могут служить следующие величины, являющиеся функциями искомых переменных:

- общая продолжительность непроизводительных простоев воздушных судов в ожидании вылета:

$$f_1(x) = \sum_{j \in J} x_j \rightarrow \min; \quad (6)$$

- суммарные финансовые потери, вызванные непроизводительными простоями воздушных судов в аэропорту:

$$f_2(x) = \sum_{j \in J} c_j x_j \rightarrow \min. \quad (7)$$

Кроме того, в некоторых случаях при решении данной задачи используется также критериальная функция

$$f_3(x) = \sum_{j \in J} k_j x_j \rightarrow \max, \quad (8)$$

где k_j – коэффициент приоритетности рейса, выполняемого j -м воздушным судном; $k_j \geq 0$; $j \in J$.

В приведенной формальной постановке задача корректировки суточного плана полетов заключается в отыскании вектора значений переменных $x^* = (x_j^*, j \in J)$, обращающего в соответствующий оптимум (минимум или максимум) одну из критериальных функций (6)–(8) при соблюдении системы ограничений (2)–(5).

Как видно, все критериальные функции, а также ограничения (4)–(5) имеют линейную структуру, тогда как выражения, стоящие в левых частях ограничений (2)–(3), представляют собой кусочно-линейные функции искомых переменных. Последнее исключает возможность использования для решения данной задачи стандартных алгоритмов линейного программирования.

Ограничения, содержащие модуль разности двух линейных функций (или линейной функции и константы), весьма часто встречаются в математических моделях прикладных задач теории расписаний [1], [2]. Для преобразования подобных выражений к линейной форме используется следующий известный прием [3].

Предположим, в систему ограничений некоторой оптимизационной задачи входит кусочно-линейное неравенство

$$\varphi(u) \geq 0,$$

где u – вектор независимых переменных;

$$\varphi(u) = |\alpha(u) - \beta(u)| - \gamma;$$

$\alpha(u)$ и $\beta(u)$ – линейные функции независимых переменных;

γ – действительное число.

Доказано, что неравенство (9) выполняется тогда и только тогда, когда одновременно справедливы два следующих неравенства:

$$\begin{cases} \varphi'(u) - \xi' \cdot v \geq 0; \\ \varphi''(u) - \xi''(1-v) \geq 0, \end{cases}$$

где $\varphi'(u) = \alpha(u) - \beta(u) - \gamma$;

$$\varphi''(u) = -\alpha(u) + \beta(u) - \gamma;$$

ξ' и ξ'' – нижние границы функций $\alpha(u)$ и $\beta(u)$ соответственно;

v – дополнительно введенная независимая логическая переменная: $v \in \{0,1\}$.

С учетом того, что $\min t_j = t_j^{(1)} + p_j$, а $\max t_j = t_j^{(2)}$, данное утверждение позволяет заменить каждое ограничение группы (2) парой линейных неравенств:

$$\begin{cases} t_j - (t_j^{(1)} + p_j - b_j) y_{ij} \geq b_i; \\ t_j + (a_i - t_j^{(2)}) (1 - y_{ij}) \leq a_i; \quad i = \overline{1, m}; j \in J, \end{cases} \quad (10)$$

а каждое ограничение группы (3) – парой линейных неравенств:

$$\begin{cases} t_{j_1} - t_{j_2} - (t_{j_1}^{(1)} - t_{j_2}^{(2)} + p_{j_1}) \cdot z_{j_1 j_2} \geq 0; \\ t_{j_2} - t_{j_1} - (t_{j_2}^{(1)} - t_{j_1}^{(2)} + p_{j_2}) (1 - z_{j_1 j_2}) \geq 0; \quad j_1 \in J; j_2 \in J \setminus \{j_1\}, \end{cases} \quad (11)$$

где y_{ij} и $z_{j_1 j_2}$ – дополнительные булевы переменные:

$$y_{ij} \in \{0,1\}; \quad i = \overline{1, m}; \quad j \in J; \quad z_{j_1 j_2} \in \{0,1\}; \quad j_1 \in J; \quad j_2 \in J \setminus \{j_1\}.$$

В результате описанных преобразований задача корректировки суточного плана полетов сводится к отысканию векторов значений непрерывных переменных $x^* = (x_j^*, j \in J)$ и бивалентных переменных $y^* = (y_{ij}^*; i = \overline{1, m}, j \in J)$, $z^* = (z_{j_1 j_2}^*; j_1 \in J, j_2 \in J \setminus \{j_1\})$, обращающих в соответствующий оптимум одну из критериальных функций (6)–(8) при соблюдении линейных ограничений (4)–(5) и (10)–(11).

Указанные преобразования переводят рассматриваемую задачу в класс задач линейного частично-целочисленного программирования с булевыми переменными. Поэтому для ее решения может быть использован метод, основанный на известной идее ветвей и границ в сочетании с симплексным алгоритмом

[4]. Согласно этому методу, на каждом этапе вычислительного процесса с помощью симплексного алгоритма решается ослабленная задача линейного программирования, в которой условия бивалентности логических переменных y_{ij} , $i = \overline{1, m}$, $j \in J$ и $z_{j_1 j_2}$, $j_1 \in J$, $j_2 \in J \setminus \{j_1\}$, не получивших еще конкретных значений, заменяется традиционным требованием их неотрицательности: $y_{ij} \geq 0$ и $z_{j_1 j_2} \geq 0$. Если в полученном решении для какой-либо булевой переменной нарушается условие бивалентности, ей присваивается ближайшее дискретное значение 0 или 1. После этого реализуется следующий этап вычислительного процесса и т.д.

Процесс завершается нахождением векторов значений независимых переменных $x^* = (x_j^*, j \in J)$, $y^* = (y_{ij}^*; i = \overline{1, m}, j \in J)$ и $z^* = (z_{j_1 j_2}^*; j_1 \in J, j_2 \in J \setminus \{j_1\})$ или установлением факта несовместности системы ограничений. Последнее свидетельствует о невозможности формирования плана полетов при заданных условиях.

Полученный в результате решения задачи вектор значений переменных $x^* = (x_j^*, j \in J)$ определяет моменты вылета рассматриваемых воздушных судов из аэропорта согласно соотношению (1).

Компьютерная реализация рассмотренной задачи осуществлена в операционной среде UNIX IP с использованием языка C++ .

Выводы

Новизна предлагаемого подхода заключается в применении для оперативной корректировки СПП строгой математической модели, которая, в отличие от широко распространенных в практике управления аэропортом эвристических алгоритмов, обеспечивает получение обоснованных управленческих решений, оптимальных по технологическим и экономическим критериям. Это, в свою очередь, позволяет сократить сроки действия нештатной ситуации в аэропорту и снизить финансовые потери участников авиатранспортного процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конвей Р.В., Максвелл В.Л., Миллер Л.В. Теория расписаний. – М.: Наука, 1975. – 360 с.
2. Танаев В.С., Ковалев М.Я., Шафранский Я.М. Теория расписаний. Групповые технологии. – Минск: Ин-т технической кибернетики НАН Белоруссии, 1998. – 290 с.
3. Корбут А.А., Финкельштейн Ю.Ю. Дискретное программирование. – М.: Наука, 1969. – 368 с.
4. Зайченко Ю.П. Дослідження операцій. – К.: ЗАТ ВІТОЛ, 2000. – 687 с.