

# АЛГОРИТМ СОСТАВЛЕНИЯ РАСПИСАНИЯ ПОЛЕТА ГРУППЫ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНА ПОСАДКИ <sup>92</sup>

Кулида Е.Л., Егоров Н.А., Лебедев В.Г.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,  
Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная д.65  
lenak@ipu.ru, egorov@ipu.ru, lebedev@ipu.ru

*Аннотация:* Рассматривается задача составления расписания полета группы воздушных судов с целью проверки реализуемости предлагаемого оптимального плана посадок. Алгоритм составления расписания полета группы воздушных судов использует алгоритм расчета скорости полета вдоль траектории и алгоритм расчета оптимального плана полета воздушного судна.

Ключевые слова: план полета воздушного судна, расчет скорости вдоль траектории, составление расписания.

## Введение

Одной из центральных проблем при организации воздушного движения вблизи аэропорта является задача определения оптимальной последовательности приземлений воздушных судов (ВС) [1-2]. После определения такой последовательности и расчета соответствующих времен посадок, удовлетворяющих всем нормам эшелонирования, нужно построить расписание полетов группы воздушных судов для реализации этого плана посадок или сделать вывод о невозможности реализации предложенного плана и необходимости его изменения.

В докладе рассматривается постановка задачи и предлагается алгоритм ее решения, на основе использования алгоритмов расчета скорости движения ВС вдоль траектории и расчета корректного плана полета ВС.

## 1 Постановка задачи

Рассматривается группа ВС с номерами  $\overline{1, M}$ .

Каждое ВС принадлежит одному из классов турбулентности  $C_m$  (например, легкое ВС, среднее ВС, тяжелое ВС).

Известен оптимальный план пролета последней перед заходом на ВПП точки  $z_k$ , с координатами [3]:

- последовательность ВС:  $\{y\}$ , где  $y$  – перестановка номеров ВС  $\overline{1, M}$ ;
- времена пролета точки  $\{t\}$ ;
- скорость пролета точки  $v_k$ , одинаковая для всех ВС.

Маршруты ВС проходят через точки воздушного пространства  $\overline{1, L}$ . Для каждой точки известны координаты  $(z_i^j)$  и минимальная и максимальная скорость пролета точки:

$(z_i^j), v_{max}(z_i^j)$  ВС с номером  $j$ .

При пролете точек маршрута должны выполняться нормы эшелонирования между ВС:

– минимальная дистанция при пролете ВС класса турбулентности  $C_{j+1}$  после ВС класса турбулентности  $C_j$ .

Определение 1. Состоянием ВС назовем координаты, скорость и время пролета точки воздушного пространства:  $(lat^j, lon^j, v^j, t^j)$ :

Для ВС с номером  $j$  известны:

- начальное состояние:  $(lat_k, lon_k, v_k, t_k^j)$ , в котором ВС находится в начальный момент времени;
- маршрут полета – последовательность точек воздушного пространства  $Z^j = \{z_1^j, \dots, z_{i_j}^j\}$ , через которые должен проходить полет из начального состояния в конечное состояние  $(lat_k, lon_k, v_k, t_k^j)$ ;
- ограничения на скорость и ускорение в зоне предпосадочного маневрирования на малой высоте:  $\dot{v} \leq \dot{v}_{max}$   $[t]$ .

Определение 2. Планом полета ВС с номером  $j$  назовем последовательность точек его маршрута, с указанием состояния в каждой точке маршрута:

<sup>92</sup> Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-08-00822) и Программы I.30 Президиума РАН.

$$Z^j = \{(lat_0^j, lon_0^j, v_0^j, t_0^j), (z_1^j, v_1^j, t_1^j), \dots, (z_{i_j}^j, v_{i_j}^j, t_{i_j}^j), (lat_k, lon_k, v_k, t_k^j)\}.$$

Определение 3. План полета ВС с номером  $j$  назовем корректным, если в каждой точке маршрута  $z_i^j, i = \overline{1, l_j}$  выполняются условия:

- скорость входит в заданный для точки диапазон:  $v_{min}(z_i^j) \leq v_i^j \leq v_{max}(z_i^j)$ ;
- выполнены нормы эшелонирования между пролетающими через точку  $z_i$  ВС  $r$  и следующего за ним ВС  $j$ :  $t_i^j \geq t_i^r + S_{C_r, C_j} / v_i^j, i = \overline{1, L}$ .
- каждый отрезок траектории может быть реализован без нарушения ограничений по скорости и ускорению;
- ВС прибывает в конечную точку в соответствии с оптимальным планом.

Определение 4. Расписанием полета группы ВС назовем совокупность корректных планов полетов для всех ВС.

Задача заключается в составлении расписания полета группы ВС или, если расписание составить не удалось, выводе о нереализуемости предложенного оптимального плана.

## 2 Расчет скорости вдоль траектории

Важную роль в построении расписания полета группы ВС играет алгоритм расчета скорости полета вдоль траектории, предложенный в работе [4].

На основе значений средней скорости  $\bar{v} = L/T$ , где  $L$  – общая длина маршрута,  $T$  – время прохождения маршрута, минимально возможной средней скорости  $\bar{v}_{min}$ , рассчитанной на основе ограничений и граничных условий:

$$\bar{v}_{min} = v_{min} + \frac{1}{2T} \left[ \frac{(v_k - v_{min})^2}{a_{max}} - \frac{(v_{min} - v_0)^2}{a_{min}} \right],$$

и максимально возможной средней скорости  $\bar{v}_{max}$ , рассчитанной на основе ограничений и граничных условий:

$$\bar{v}_{max} = v_{max} - \frac{1}{2T} \left[ \frac{(v_0 - v_{max})^2}{a_{max}} - \frac{(v_{max} - v_k)^2}{a_{min}} \right]$$

можно выделить три ситуации:

1. Подобласть  $\bar{v} \in (\bar{v}_{max}, \infty)$ .

При соблюдении начальных условий и заданных ограничений  $\forall v(t) L > \int_0^T v(t) dt$

и, таким образом, ВС не успевает прилететь в конечное состояние в заданное время, поскольку траектория слишком длинная.

2. Подобласть  $\bar{v} \in (\bar{v}_{min}, \bar{v}_{max})$ .

Скорость, удовлетворяющая условиям, может быть рассчитана.

3. Подобласть  $\bar{v} \in (-\infty, \bar{v}_{min})$ .

При соблюдении заданных ограничений,  $\forall v(t) L < \int_0^T v(t) dt$ , т.е. для решения задачи необходимо выбрать траекторию большей длины.

## 3 Алгоритм составления расписания

Шаг 1. Рассчитать для ВС с номером  $u_1$  скорость полета вдоль траектории, проходящей через точки маршрута, и оптимальный план полета.

Шаг 2. Рассмотреть следующее ВС из оптимальной последовательности посадок. Если все ВС рассмотрены, то расписание составлено, завершение алгоритма.

Шаг 3. Рассчитать скорость полета для очередного ВС с номером  $j$  вдоль траектории, проходящей через точки маршрута, и оптимальный план полета.

Шаг 4. Рассмотреть очередную точку построенного оптимального плана полета  $z_i^j, i = \overline{1, l_j}$ . Если все точки рассмотрены, перейти к шагу 2.

Шаг 5. В рассматриваемой точке воздушного пространства  $z_i^j$  рассчитать  $T_i^j = t_i^{j-1} + S_{C_{j-1}, C_j}$  – минимальное допустимое время полета точки  $z_i^j$ , ВС с номером  $j$ , при котором выполнены условия

разделения с предыдущим ВС с номером  $j-1$ , пролетающим через точку  $z_i^j$ . Если  $t_i^j < T_i^j$ , то перейти к шагу 6, если  $t_i^j \geq T_i^j$ , то перейти к шагу 4.

Шаг 6. Рассчитать новый план полета для ВС с номером  $j$ , состоящий из 2 частей: от начальной точки до точки  $z_i^j$ :

$$\left\{ (l, \dots), (z, \dots) \right\}$$

и от точки до конечной точки:

$$\left\{ (z, \dots), (Lat, \dots) \right\}$$

Если обе части плана полета успешно построены, то принять новый план и перейти к шагу 4, в противном случае перейти к шагу 7.

Шаг 7. Если план  $Z_2^j$  успешно построен, то перейти к шагу 8. В противном случае ВС с номером  $j$  не успевает прилететь в конечную точку в заданное время и оптимальный план пролета конечной точки реализован быть не может, завершение алгоритма.

Шаг 8. Если удалось построить план  $Z_1^j$ , то принять новый план и перейти к шагу 4. В противном случае траектория от начальной точки до точки  $z_i^j$  слишком короткая, рассчитывается нужная длина траектории. Если удлинение траектории на заданном участке маршрута реализуемо, то принять новый план и перейти к шагу 4. В противном случае оптимальный план пролета конечной точки реализован быть не может, завершение алгоритма.

## Литература

1. Вересников Г.С., Егоров Н.А., Кулида Е.Л., Лебедев В.Г. Методы построения оптимальных очередей воздушных судов на посадку. Ч. 1. Методы точного решения. Проблемы управления, 2018, № 4. – С. 2-13.
2. Г.С. Вересников, Н.А. Егоров, Е.Л. Кулида, В.Г. Лебедев Методы построения оптимальных очередей воздушных судов на посадку. Ч. 2. Методы приближенного решения // Проблемы управления, 2018, № 5. – С. 2-13.
3. Кулида Е.Л., Егоров Н.А., Лебедев В.Г. Формирование оптимальных очередей воздушных судов на прилет / Материалы 11-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2018, Москва). М.: ИПУ РАН, 2018. Т. 2. С. 296-297.
4. Баженов С.Г., Егоров Н.А., Кулида Е.Л., Лебедев В.Г. Управление траекторией и скоростью самолета при заходе на посадку в условиях пересеченной местности – Проблемы управления. 2015. № 2. С. 45-51.