

Предлагаемые модели рисков (дополнительно к CRM из [1]) основаны на определениях понятия «риск», взятых из документов Госстандарта-Р и ИКАО.

В принятых моделях считается, что риск — это опасность или количество опасности (с нечеткой мерой) в состоянии, когда возможно (прогнозируется) дискретное рисковое событие  $R$ , которое может быть или не быть в опытах или при испытании систем.

Предложенные формулировки дают возможность использовать математическую модель рискового события (дискретного) с двумя свойствами:

- случайность (или частота) появления события при некоторых условиях, например, обозначенных в виде  $\Sigma_0$ ;
- нежелательные последствия или потери (с ущербом для изучаемой системы).

Интегральная оценка  $\hat{R}$ , зависящая от двух свойств рискового события, может быть получена, если принять, что оценка  $\hat{R}$  риска — это множество из двух показателей;  $\mu_1$  — характеристика частоты и неопределенности появления нежелательного (рисковог) события, например, в виде  $\mu_1 = \mu_p$  — вероятность;  $\mu_1$  — статистика;  $\mu_1$  — коэффициент риска по ИКАО [3] в виде частоты катастроф, нормированных ко времени работы (в часах налета ВС), к числу взлетов и посадок в виде нормы  $10^{-6}$  (млн).

Введенные понятия адекватно отражают смысл таких высказываний, как, например, «полет на самолете связан с определенным риском для жизни», т. е. с опасностью; или «имеется риск серьезного заболевания ...» и т. д.

Применение понятия «риск» в смысле «количество опасности» более предпочтительно в задачах, связанных с оценкой убытков, ущербов и т. п., поскольку при этом дается ориентир для разработки вычислительных процедур. В задачах по RVSM это будет наиболее продуктивно, так как TLS\* вычисляются по Райху с большой ошибкой, но TLS фактически нельзя получить практическим путем.

Предлагается показатель TLS, вытекающий из (1), считать допустимой нормой, т. е. приемлемым риском по [2]:

$$TLS \rightarrow TLS^*,$$

где \* — критичность.

В таком случае это и будет приемлемое (допустимое), например по [там же], количество опасности в форме среднего числа катастроф за 1 час полета двух ВС на заданных эшелонах.

Из формулы (1) видно, что это простая модель типа CRM, но в предположении, что «два шара» (к примеру, два ВС) движутся навстречу друг другу (или иначе) и могут столкнуться. Никакого управления в этой формуле не предусмотрено, что не соответствует действительности. И если учесть, что TLS\* вычисляется просто путем манипуляций с четкими формулами в виде ф.р.в., ф.п.р.в., которых тоже нет, а есть только нечеткие функции этого вида, то подобная модель CRM должна быть скорректирована, например, по [3].

### Вывод

В ситуации диспетчерского управления движением ВС при стратегии RVSM методологическая основа оценивания безопасности полетов через показатели рисков конфликтов ВС на эшелонах подтверждает необходимость развития новых подходов из ANNEX-19 для нормирования TLS. Нечеткость исходных данных также приводит к необходимости корректировки моделей типа CRM. ■

### Литература

1. Fujita M. Frequency of Rare Event Occurrences. ATN/CNS. Tokyo. Japan. EIWAC. 2009.
2. Doc. 9859 AN/470 Руководство по управлению безопасностью полетов (РУБП). 2-е изд. ИКАО, 2009.
3. Куклев Е. А. Оценка рисков катастроф в высоконадежных системах // Труды 13-й Межд. конф. «Проблемы управления безопасностью сложных систем». ИПУ РАН. М.: 2005. С. 55–57.
4. Смуров М. Ю., Куклев Е. А., Евдокимов В. Г., Гипич Г. Н. Безопасность полетов воздушных судов гражданской авиации с учетом рисков возникновения негативных событий // Транспорт Российской Федерации. 2012. № 1 (38). С. 54–58.
5. Аронов З. И., Александровская Г. Г. и др. Безопасность и надежность технических систем. М.: Логос, 2008.

# Подходы к решению задач траекторного управления в активной системе организации воздушного движения

Практическими задачами, в основе решения которых лежит концепция траекторного управления, являются, например, такие как тактическое планирование и организация потоков воздушного движения, формирование и регулирование потоков прилетающих и вылетающих воздушных судов (ВС) в районе аэродрома. В будущем в основу прогноза траекторий в интегрированных системах организации воздушного движения (ОрВД), скорее всего, ляжет использование траекторных данных, рассчитываемых бортовыми системами управления. Но в ближайшей и среднесрочной перспективе в автоматизированных системах ОрВД будут использоваться траекторные данные, рассчитываемые модулями наземного базирования [1].



**В. В. Панферов,**  
доктор техн. наук, профессор, заведующий  
кафедрой электротехнического обеспечения  
полетов СПбГУ ГА



**А. П. Плясовских,**  
доктор техн. наук, начальник  
научно-исследовательской лаборатории  
ОАО «ВНИИРА»



**Ю. Е. Хорошавцев,**  
доктор техн. наук, профессор кафедры  
систем автоматизированного  
управления СПбГУ ГА



**В. В. Купин,**  
канд. техн. наук, доцент кафедры  
организации и управления в транспортных  
системах СПбГУ ГА

В основе как разрабатываемых, так и уже применяемых методов, процедур и средств управления воздушным движением (УВД) лежит операционная концепция траекторного управления, подразумевающая знание и совместное использование текущего и планируемого положения ВС в пространстве:

$$(x_0^s, y_0^s, z_0^s, t_0; x_1^s, y_1^s, z_1^s, t_1; \dots; x_{N-1}^s, y_{N-1}^s, z_{N-1}^s, t_{N-1}; x_N^s, y_N^s, z_N^s, t_N),$$

где  $x_0^s, y_0^s, z_0^s$  — пространственные координаты  $s$ -го ВС;

$t_i$  — дискретные моменты времени.

В целях организации траекторного управления (или управления 4D-траекториями) в воздушном пространстве исследуемой зоны устанавливаются контрольные точки, для прохождения которых для каждого  $s$ -го ВС устанавливаются целевые моменты времени их пролета —  $RTO_{je}^{(s)}$ , где  $J$  — множество контрольных точек. В базовых вариантах таких средств контрольные точки могут задаваться двумя своими координатами  $x_j^{(s)}, y_j^{(s)}$ .

Как правило, при формировании последовательности пролета каждой контрольной точки этими средствами учитываются такие критерии, как:

- экономичность —  $E$ ;
- величина задержки —  $Z$ ;
- пропускная способность элементов воздушного пространства и системы ОрВД —  $C$ .

Сегодня в мировой практике существует целый ряд средств автоматизации, выполняющих роль систем поддержки принятия решений при определении значений  $RTO_j^s$ . Это так называемые организаторы прилетов и вылетов (arrival manager — AMAN, departure manager — DMAN) [2; 3], организаторы полетов на маршрутах (en-route manager — EMAN), средства организации воздушного движения с учетом пропускной способности (capacity manager — CAPMAN) и др. Результатом решения задачи формирования потока прилетающих ВС является последовательность моментов времени пролета прилетающими ВС в установленной очередности какой-либо выбранной контрольной точки (например, точки торца взлетно-посадочной полосы), а также рекомендаций диспетчеру УВД по необходимой коррекции пространственно-временной траектории отдельных ВС. Результатом решения задачи формирования потока вылетающих ВС является последовательность моментов времени выдачи разрешений на запуск двигателей и взлета.

При функционировании AMAN базового уровня общая задержка реализуется, как правило, в нескольких секторах УВД, и на каждом рабочем месте отображается величина задержки, которую предполагается реализовать в данном конкретном секторе. Это дает возможность максимально использовать линейные задержки вместо задержек в орбитальных зонах ожидания (рис. 1).

Такие процедуры позволяют обеспечить:

- минимизацию задержек;
- оптимальное использование доступных ресурсов пропускной способности;
- бесконфликтное движение ВС;
- перераспределение нагрузки между смежными диспетчерскими пунктами.

Понятно, что в ситуации, приведенной на рис. 1, задача траекторного управления по обеспечению требуемого времени пролета  $RTO_A^{(s)}$  контрольной точки  $A$  конкретным  $s$ -м ВС решается несколькими диспетчерами  $D_1, D_2, \dots, D_p$  ( $P$  — количество задействованных диспетчерских пунктов УВД). Так как за каждым из них остается право выбора соответствующих действий (команд управления) в своей зоне ответственности, то решения по УВД каждого из них приводят к перераспределению задач в системе  $D_1-D_2-\dots-D_p$ . Например, если все диспетчеры проигнорируют рекомендации, касающиеся реализации задержки, то вся нагрузка по реализации задержки ложится на диспетчера диспетчерского пункта круга (ДПК), который будет вынужден использовать орбитальные зоны ожидания или процедуры векторения.

Итак, диспетчеры  $D_1, D_2, \dots, D_p$  оказываются вовлечены в ситуацию кооперативной игры. Следует также учитывать активность и других элементов: экипажей ВС ( $\Xi$ ), а также руководителей полетов (РП), несущих ответственность за безопасность воздушного дви-

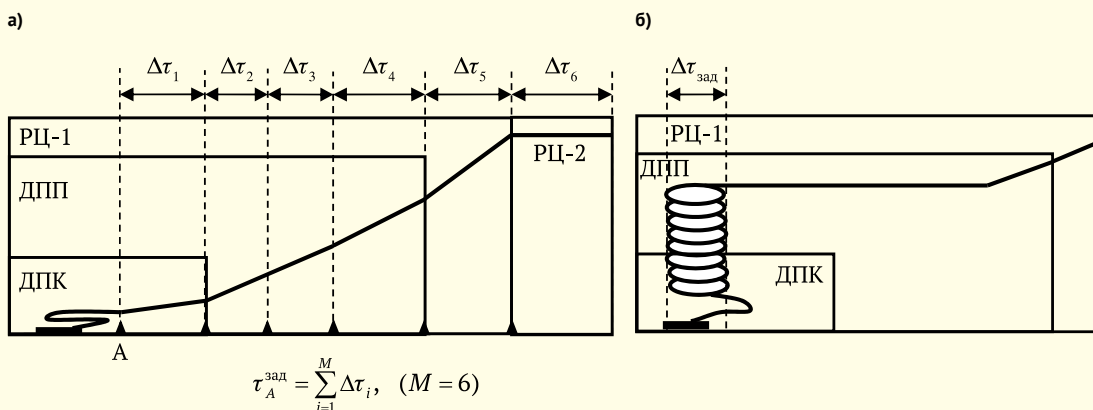


Рис. 1. Линейные (а) и орбитальные (б) задержки ВС

жения во всей зоне ответственности (РДЦ, АДЦ или АКДП). Таким образом, фактическая реализация  $TR_s^{\Phi}$  рекомендаций средств поддержки решений по траекторному управлению  $s$ -м ВС оказывается зависящей от действий всех вовлеченных активных элементов:

$$TR_s^{\Phi} = (Re(E, Z, C); g_s, g_{PI}^{(s)}, g_{D}^{(s)}),$$

где  $Re(E, Z, C)$  — рекомендации, выданные средством поддержки решений;  $g_s, g_{PI}^{(s)}, g_{D}^{(s)}$  — предпочтения по выбору решений при управлении движением  $s$ -м ВС соответственно экипажа, PI, диспетчеров УВД.

В связи с этим актуальной является задача анализа и формализации задач траекторного управления в системе ОрВД с учетом активности ее ключевых элементов: РП-Д<sub>i</sub>-Э<sub>is</sub>.

Еще одной задачей, формализация которой требует учета активности ее ключевых элементов, является построение модели системы совместного (коллективного) принятия решений (СМД) при траекторном управлении воздушным движением, где игровая ситуация рассматривается уже в системе «корпоративных» игроков: орган ОВД — эксплуатанты — аэропорт — службы наземного обеспечения полетов [4].

### Подходы к формализации задач траекторного управления в активной системе ОрВД

В основе траекторного управления лежит прогноз движения ВС. Исходными данными для решения задачи прогноза траекторий движения ВС являются следующие: плановая информация, радиолокационные данные, данные операционно-эксплуатационной среды, метеорологическая информация, информация об используемых процедурах ОрВД, данные о летно-технических характеристиках ВС (функционально-эксплуатационные модели ВС). Перечисленные данные и информацию можно условно назвать общими (исходными) полетными данными.

Соответствующий уровень доверия прогноза профиля полета ВС определяется степенью неопределенности входных данных модуля прогноза траекторий. В качестве составляющих этой неопределенности можно назвать случайность, неточность измерений и нечеткость. В качестве же факторов, обуславливающих неопределенность, можно перечислить следующие: организационно-технический, внешней среды и активный.

Под активным фактором понимается система предпочтений, мотиваций, активных элементов (АЭ) (пилоты отдельных ВС, диспетчеры УВД) и систем (отдельные службы аэропорта, наземного обслуживания, авиакомпании, общественные объединения граждан). При этом концептуальные модели движения отдельных ВС для разных АЭ, а значит, и критерии управления им отличны друг от друга.

В связи с этим можно выделить две составляющие эффективности моделей задачи траекторного управления (и функционирования соответствующих средств поддержки принятия решений (СПР)): адекватность оценки ситуации и генерируемых сценариев (планов, последовательностей прилета и вылета) и точность прогноза траекторий движения отдельных ВС.

Относительно адекватности генерируемых сценариев следует сказать, что заданная точность их реализации еще не обеспечивается наличием соответствующих возможностей с точки зрения организационно-технического фактора и фактора внешней среды, а также перспективой оптимизации по выбранным управляющим органом критериям. Определяющее значение имеют предпочтения, намерения, готовность и заинтересованность АЭ в выполнении запланированного сценария, т. е. приемлемость данного сценария. Но и при оценке уровня доверия прогнозируемых траекторий движения ВС, определяющего их точность, учет активного фактора также имеет важное значение [5].

Для работы СПР по траекторному управлению формируются базы данных в виде многомерных признаков массивов и задаются процедуры  $\Xi$  их обработки, позволяющие по исходной конечной совокупности признаков (информации)  $a_{(i)} = (a_{(i)}^1, \dots, a_{(i)}^n)$  ( $a_{(i)}^1 \in A^1, \dots, a_{(i)}^n \in A^n$ ) определить верхнюю  $\bar{T}_{TE}$  и нижнюю  $\underline{T}_{TE}$  границы оценки времени наступления интересующего целевого события (Target Event) с заданным уровнем доверия  $\alpha$ :  $\Xi: A \rightarrow \{\underline{T}_{TE}, \bar{T}_{TE}\}_{\alpha}$  ( $A = A^1 \times \dots \times A^n$ ).

С учетом того, что не все признаки имеют количественное выражение, а информация о влиянии фактора активности, получаемая от экспертов, характеризуется нечеткостью, для восстановления нечеткой модели  $\Xi$  возможно использование алгоритма экспертной оценки и эмпирического восстановления распределения возможностей  $P\{\{\underline{T}_{TE}, \bar{T}_{TE}\} | a_{(i)} \in A\}$  [6].

Решение задачи управления в игровых системах РП-Д<sub>i</sub>-Э<sub>is</sub> и «орган обслуживания воздушного движения (ОВД) — эксплуатанты — аэропорт — службы наземного обеспечения полетов» можно представить как поиск конфликтных равновесий в соответствующих моделях кооперативной игры с использованием подходов теории конфликтных равновесий [7]. Этот выбор обусловлен тем, что указанная теория, основываясь не на понятии характеристической функции, а на как можно более богатом множестве понятий конфликтных равновесий, позволяет находить такое решение кооперативной игры, которое:

- всегда существует;
- удовлетворяет требованию естественной устойчивости (т. е. с ним вынужден согласиться любой элемент — участник игры).

Чем более богатое множество конфликтных равновесий используется, тем больше возможностей получить единственную наисильнейшую равновесную ситуацию или, по крайней мере, максимально узкое множество ситуаций равновесия, при этом каждое равновесие представляет собой наисильнейшее из существующих равновесий.

Однако подобная методика нахождения компромиссных решений на основе системы конфликтных равновесий в задачах траекторного управления должна учитывать сведения о предпочтениях игроков. Самый распространенный способ — это получить сведения непосредственно от АЭ в результате использования тех или иных процедур оценки их мотивации и предпочтений в задачах траекторного управления воздушным движением.

Но в этом случае возможна проблема сознательного искажения таких сведений. С учетом данной проблемы один из подходов формализации может быть представлен в рамках теории управления в организационных системах [8]. Отличительной чертой получаемых моделей в этом случае является учет условий неманипулируемости при информационном обмене игроков и применение соответствующих механизмов управления при решении задачи планирования теории управления в организационных системах.

Рассмотрим постановку практических задач управления потоками прилетающих и вылетающих ВС.

### Задача управления потоками прилетающих воздушных судов

Пусть в воздушном пространстве определенных размеров в горизонтальной и вертикальной плоскостях имеется  $K$  установленных траекторий полета ВС. Рассмотрим соответствующие  $K$  маршрутов полета, под которыми, согласно [9], понимается проекция заданной (установленной) траектории полета ВС на земную (водную) поверхность, определенная основными пунктами. То есть маршрут полета задается упорядоченной конечной совокупностью опорных точек:

$$P_k = (p_1^k, \dots, p_i^k, \dots, p_{c_k}^k),$$

где  $p_1^k$  — начальная точка  $k$ -го маршрута (например, точка входа в заданное воздушное пространство);

$p_c^k$  — конечная точка  $k$ -го маршрута ( $k \in K, i = \overline{1, C^k}$ ).

Так как каждый маршрут, вообще говоря, может быть задан бесконечной совокупностью точек  $P_k^o$ , то конечная совокупность  $P_k$  может быть получена в результате операции интервальной дискретизации  $D_{int}$  [10]. В этом случае между двумя крайними точками маршрута  $p_1^k$  и  $p_c^k$  вставляется  $n$  открытых в общем случае произвольных непересекающихся интервалов  $]p_i^k, p_{i+1}^k[$ ,  $i = \overline{1, C^k - 1}$ , таких, что  $\bigcap_{i=1}^{C^k-1} ]p_i^k, p_{i+1}^k[ = \emptyset$  и  $P_k^o \setminus \bigcup_{i=1}^{C^k-1} ]p_i^k, p_{i+1}^k[ = P_k$  — конечное множество.

Каждой точке  $p_i^k$  поставим в соответствие значение параметра  $d_{i,C^k}^k$  — удаление данной  $i$ -й точки  $k$ -го маршрута от конечной точки этого маршрута. Причем параметр «удаление» будем понимать в широком смысле — его значение может определяться как с использованием метрических (абсолютных и относительных), так и топологических (порядковых) шкал.

Пусть все  $K$  маршрутов не имеют общих точек (не пересекаются), кроме одной —  $p_c$ , для которой справедливо:  $d_c = d_{c1}^1 = \dots = d_{cK}^K = 0$ , т. е. все  $K$  маршрутов (или интересующих их участков) сходятся и заканчиваются в одной точке —  $p_c$ , которую назовем контрольной точкой, или точкой схождения маршрутов полета ВС (например, точка выхода на предпосадочную прямую, точка пролета радиомаяка, торца ВПП и пр.). Пример представления описанной ситуации в горизонтальной плоскости представлен на рис. 2.

В вертикальной плоскости в заданном воздушном пространстве может быть задана конечная упорядоченная совокупность установленных уровней (эшелонов, высот) полета ВС  $\Theta = (h_1, \dots, h_M)$ , где  $h_1$  — самый нижний, а  $h_M$  — самый верхний используемый уровень полета в заданном объеме воздушного пространства.

С точки зрения ограничений, определяемых летно-техническими ограничениями возможности реализации захода на посадку, пролет ВС отдельной опорной точки  $p_i^k$   $k$ -го маршрута в вертикальной плоскости может осуществляться на уровнях полета  $h_i^k$  из допустимого их диапазона  $H_i^k$ :  $h_i^k \in H_i^k, H_i^k \subseteq H$ . Уровень полета  $h_{c^k}^k$  над контрольной точкой для всех  $k \in K$  одинаков:  $h_{c^1}^1 = \dots = h_{c^K}^K = h_c$ . Таким образом, точка схождения маршрутов  $p_c$  является еще и точкой слияния пространственных траекторий (3D-траекторий), установленных в заданном объеме воздушного пространства.

Для решения задачи формирования потоков прилетающих ВС 3D-траектория движения каждого из них в рассматриваемом объеме воздушного пространства может быть представлена отношением  $R_p$ , заданном на произведении множеств  $P_k = (p_1^k, \dots, p_i^k, \dots, p_{c^k}^k)$  и  $H = (h_1, \dots, h_M)$ :  $R_j \subseteq P_k \times H$  ( $j = \overline{1, N}$ ;  $N$  — общее количество рассматриваемых прилетающих ВС). Таким образом, 3D-траектория движения каждого  $j$ -го представима в виде упорядоченной совокупности элементов типа  $(p_i^k, h_i)$ .

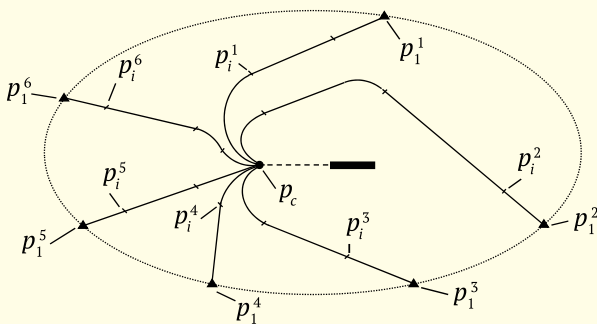


Рис. 2. Ситуация, когда все  $K$  маршрутов (или интересующих их участков) сходятся и заканчиваются в одной точке —  $p_c$

Определим цель управления потоками прилетающих ВС (УПП-ВС) как формирование и обеспечение оптимальной последовательности пролета прилетающими ВС заданной контрольной точки (точка входа в район аэродрома (РА), IAF, торец взлетно-посадочной полосы (ВПП) или любая другая точка на общем участке пути траекторий движения прилетающих ВС). Такая последовательность определяет, во-первых, очередность, а во-вторых — целевое время пролета контрольной точки прилетающими ВС.

Предположим, что в пределах горизонта планирования процессов УППВС в воздушном пространстве определенного РА в некоторый момент времени  $t_0$  находится  $S$  прилетающих ВС. Каждое  $s$ -е ВС ( $s = \overline{1, S}$ ), реализуя номинальную (плановую, предустановленную, без наличия внешних управляющих воздействий) пространственно-временную траекторию полета (4D-траектория), пройдет установленную контрольную точку в момент времени  $t_s$ . Тогда интервал  $\Delta T^H = t_s - t_0$  будет представлять собой номинальный интервал выбранного горизонта планирования, т. е. промежутков времени с момента начала процесса оперативного планирования и до момента времени посадки последнего  $s$ -го ВС, имеющего отношение к данному горизонту планирования. Интервал  $\Delta T_p^H = t_s - t_1$  назовем интервалом реализации последовательности прилета горизонта планирования. Интервал  $\Delta \tau_1^H = \Delta T^H - \Delta T_p^H$  представляет собой минимальной промежуток времени для осуществления управляющих воздействий, направленных на реализацию данной последовательности прилета (он соответствует имеющемуся в распоряжении промежутку времени для возможных управляющих воздействий на первое ВС в последовательности). Так как в номинальной последовательности ни одно ВС не подвергается управляющим воздействиям, то  $\Delta \tau_1^H = t_0 - t_1$ .

Через  $SQ^H$  обозначим соответствующую номинальную (реальную или свободную) последовательность пролета контрольной точки всеми  $S$  ВС:

$$SQ^H = \{t_1, t_2, \dots, t_N\}, \quad (1)$$

где  $t_{k-1} \leq t_k$ .

Введем следующее ограничение безопасности последовательности прилета:

$$|t_{s-1} - t_s| \geq \tau_{\min}, \forall s = \overline{2, S}. \quad (2)$$

Интервалы  $\tau_{\min}$  между парой следующих друг за другом ВС при пролете установленной контрольной точки зависят как от массы ВС, так и от скорости их движения, особенностей производства полетов, использования структуры воздушного пространства и технологии ОВД. Будем считать, что в каждом конкретном случае значение интервала между  $s$ -м и  $(s+1)$ -м ВС  $\tau_{\min}^{(s,s+1)}$  выбирается из множества их установленных значений  $\Theta: \tau_{\min}^{(s,s+1)} \in \Theta$ .

Обозначим через  $S_{SQ}(S, \Delta T_p^H, \Theta)$  множество (совокупность) возможных последовательностей прилета из  $S$  ВС, на интервале реализации последовательности  $\Delta T_p^H$ , в которой соблюдены интервалы безопасности  $\tau_{\min}$ .

На конкретном сегменте планирования относительно последовательности возможны следующие ситуации:

- $SQ^H \in S_{SQ}(S, \Delta T_p^H, \Theta) \neq \emptyset$ , т. е. в данной реальной последовательности при отсутствии управляющих и других внешних воздействий соблюдаются условия безопасности (2);
- $SQ^H \notin S_{SQ}(S, \Delta T_p^H, \Theta) \neq \emptyset$ , но среди  $S_{SQ}(S, \Delta T_p^H, \Theta)$  есть такая (или такие), где сохранен порядок индексов (очередность ВС) номинальной последовательности; т. е. если  $P(SQ^H)$  — перестановка (очередность)  $S$  прилетающих ВС в последовательности  $SQ$ , то  $S_{SQ}(S, \Delta T_p^H, \Theta, P(SQ^H)) \neq \emptyset$ , где  $P(SQ^H)$  — перестановка  $S$  ВС в номинальной последовательности  $SQ^H$  (1);
- $SQ^H \notin S_{SQ}(S, \Delta T_p^H, \Theta) \neq \emptyset$  и  $S_{SQ}(S, \Delta T_p^H, \Theta, P(SQ^H)) = \emptyset$ , т. е. невозможно распределить  $S$  прилетающих ВС на интервале  $\Delta T_p^H$  с со-

блюдением (2) и без изменения очередности номинальной последовательности  $SQ^H$  (1);

•  $S_{SQ}(S, \Delta T_p^H, \Theta) = \emptyset, \forall P(SQ)$ , т. е. при любой перестановке (очередности)  $S$  прилетающих ВС никакие имеющиеся в распоряжении у органа ОВД управляющие воздействия не могут обеспечить распределение данной совокупности прилетающих ВС на интервале  $\Delta T_p^H$  с соблюдением установленных интервалов безопасности  $\tau_{\min}^{(s,s+1)}$  между любыми двумя из них, следующих друг за другом (т. е.  $\sum_{s=1}^{S-1} \tau_{\min}^{(s,s+1)} > \Delta T_p^H$ ).

Последовательность с перестановкой номинальной последовательности  $P(SQ^H)$ , в которой обеспечены интервалы безопасности  $\tau_{\min}^{(s,s+1)}$  между прилетающими ВС в контрольной точке, реализуемая на интервале  $\Delta T_p^H$  (ситуации 1, 2), либо на интервале  $\Delta T_p^r = \sum_{s=1}^{S-1} \tau_{\min}^{(s,s+1)} > \Delta T_p^H$  (ситуации 3, 4), называется естественной последовательностью прилета  $SQ^r$ . В естественной последовательности соблюден принцип «первым пришел – первым обслужен» (не меняется естественная очередность пролета контрольной точки прилетающими ВС), а также соответствующие интервалы безопасности между любыми двумя следующими друг за другом ВС.

Общее число возможных перестановок  $S$  ВС в последовательности прилета  $SQ$  без ограничений по величине задержки каждого из них равно  $S$ . Конечно, диспетчер рассматривает не все, но только некоторую их совокупность, определяемую в результате применения некоторых эвристик. При реализации последовательности, оптимальной с точки зрения критериев задержки и экономичности, нужно время, во-первых, для ее выбора, а во-вторых, для реализации соответствующих команд управления. Это время есть в распоряжении диспетчера при низкой и средней интенсивности воздушного движения. При высокой интенсивности, учитывая доминирующее значение критерия безопасности, при недостатке ресурса времени для выбора варианта последовательности прилетающих ВС диспетчер будет использовать только этот единственный критерий. В таком случае от СПР требуется сформировать оптимальную последовательность как бы «за диспетчера» и выдать ему рекомендации по процедурам (командам) ее реализации. Соответствие типов формируемых СПР последовательностей прилета и интенсивности воздушного движения может быть представлено, как в табл.

**Задача управления потоками вылетающих воздушных судов**

В результате реализации процедур организации и регулирования потоков вылетающих ВС должны решаться следующие задачи:

- сбор и анализ информации о статических/стратегических и динамических/тактических факторах планирования; к первым относятся ограничения, критерии, предпочтения, ко вторым –

события, условия и ограничения, устанавливаемые лицом, принимающим решения (ЛПР), посредством ручного ввода;

- формирование плана (последовательности) вылетов;
- контроль факторов планирования и обеспечение сформированного плана (последовательности) вылетов;
- прогноз и предоставление информации о динамических факторах (событиях) в целях обеспечения ситуационной осведомленности и информированности диспетчеров ОВД о выполнении сформированного плана (последовательности) вылетов;
- синтез и предоставление рекомендаций по управляющим воздействиям диспетчерам ОВД в целях обеспечения сформированного плана (последовательности) вылетов.

В основе функционирования средства DMAN лежит процедура расчета для каждого рейса (вылетающего ВС) целевых значений времени осуществления таких ключевых событий, как выдача органом ОВД разрешения на запуск двигателей  $t_i^{R3L}$  и взлет ВС  $t_i^{R3L}$ . Формирование целевой последовательности  $S_{\Pi} = (t_1^{R3L}, t_2^{R3L}, \dots, t_N^{R3L})$  и будет целью процесса планирования DMAN.

Формирование  $S_{\Pi}$  происходит в несколько этапов, на каждом из которых учитывается дополнительная, усиливающая степень детерминированности последовательности, информация.

На первом этапе формируется так называемая реальная последовательность  $S_p = (t_1^{R3L(P)}, t_2^{R3L(P)}, \dots, t_N^{R3L(P)})$ . По сути она представляет собой фрагмент суточного плана вылетов  $P_{\text{выл}}$ . Величина, или протяженность, этого фрагмента определяется величиной горизонта планирования DMAN реальной последовательности  $\Delta T_p$ . Дополнительно при ее формировании учитывается информация о назначенных для вылетов ВПП, и ограничениях их использования  $R^i$  (ВПП), а также запланированном времени вылета  $STD_p$ , указанного в плане полета:

$$S_p = \Psi [P_{\text{выл}}(\Delta T_p), STD_p, \text{ВПП}, R^i(\text{ВПП}_i)].$$

В последовательности  $S_p$  обязательно будут обеспечены условия безопасности, для этого далее необходимо учесть информацию об интервалах безопасности при взлете, определяемых категорией ВС ( $WTC$ )  $\Delta t_i^{\text{без}}$  ( $WTC$ ), и интервалах, необходимых для обеспечения эшелонирования ВС после взлета и определяемых летно-техническими характеристиками и траекторией вылета данного ВС  $\Delta t_i^{\text{эш}}$  (ЛТХ, SID). В связи с этим на втором этапе формируется естественная последовательность:

$$S_R = \Psi [S_p, \Delta t_i^{\text{без}}, \Delta t_i^{\text{эш}}] \text{ для всех } i \in I \text{ и } j \in J,$$

где  $I$  – множество вылетающих ВС, обрабатываемых процедурой DMAN;

$J$  – множество ВПП, используемых для вылетов.

На третьем этапе формируется последовательность вылетов с учетом критериев оптимизации  $C_k^{\text{opt}}$  ( $k \in K$ ,  $K$  – множество критериев оптимизации) или их свертки  $F(C_k^{\text{opt}})$ , которая еще может изменяться процедурой DMAN:

Таблица. Соответствие типов последовательностей прилета и интенсивности воздушного движения, формируемых СПР

Условная характеристика загруженности	ИВД/ПС	Конфликтность	Тип последовательности прилета
Низкая	$\ll 1$	Отсутствует, либо единичные случаи	Реальная
Средняя	$< 0,75$	Конфликтные ситуации возникают достаточно часто, но загруженность диспетчера позволяет прогнозировать их возникновение и принимать решения с учетом критерия экономичности	Естественная
Высокая	$\approx 1$	Конфликтные ситуации возникают часто, загруженность предельная, не позволяющая обеспечить прогноз и выбор решений с учетом всех критериев качества, диспетчер ограничивается одним – безопасностью. Экономическая эффективность и общая эффективность использования располагаемых ресурсов низкие. Выбираются МР-стратегии, ограничивающие доступные ресурсы, что в свою очередь еще больше увеличивает загруженность	Оптимизируемая

$$S_{opt}^{изм} = \Psi \left[ S_R, F \left( C_k^{opt} \right) \right].$$

Автоматические изменения возможны в той ее части, которая соответствует так называемому периоду pre-departure (до наступления событий, контролируемых органом ОВД).

Для тактического периода (или периода departure), соответствующего событиям, контролируемым уже непосредственно органом ОВД, формируется неизменяемая (автоматически процедурой DMAN) оптимизированная последовательность. Она контролируется по фактическим значениям времени событий  $ATE_m^{ОВД}$  ( $m \in M$ ,  $M$  — множество событий, контролируемых органом ОВД и учитываемых в событийной модели DMAN), и изменения в ней могут происходить в результате ручных вводов  $M_n$  ( $n \in N$ ,  $N$  — множество авторизированных рабочих мест) со стороны диспетчера ОВД:  $S_{opt} = \Psi \left[ S_{opt}^{изм}, M_n, ATE_m^{ОВД} \right]$ . ■

#### Литература

1. Common trajectory prediction capability for decision support tools, Sip Swierstra, Eurocontrol HQ, Brussels, Belgium; Steven M. Green, National Aeronautics and Space Administration Ames Research Center, Moffett Field, CA. URL: [http://www.atmseminar.org/seminarContent /seminar5/papers/p\\_059\\_DS.pdf](http://www.atmseminar.org/seminarContent /seminar5/papers/p_059_DS.pdf).
2. EUROCONTROL – AMAN Guidelines 2010. Edition Number 0.1: 17th Dec 2010. Proposed Issue.

3. EUROCONTROL – The EUROCONTROL DMAN Prototype. Description of DMAN in the A-CDM context. Edition Number 0.4: 14.12.2010. Working Draft.
4. Airport CDM Operational Concept Document, Edition 3.0, September 2006, EUROCONTROL – DAP/AOE/CDM/05/04/05 – 1.
5. Крыжановский Г. А., Купин В. В., Солодухин В. А. Учет активности эргатических элементов при организации и управлении потоками воздушного движения // Состояние и перспективы развития автоматизированных систем планирования использования воздушного пространства в РФ (ПивП-2011): Сб. тр. Российск. науч.-техн. семинара 22–24 ноября 2011 г. М.: ФГУП «ГосНИИАС», 2011. С. 19–27.
6. Пытьев Ю. П. Возможность, как альтернатива вероятности. М.: Физматлит, 1999. 212 с.
7. Смольяков Э. Р. Теория конфликтных равновесий. М.: Едиториал УРСС, 2005. 304 с.
8. Новиков Д. А. Теория управления в организационных системах. М.: МПСИ, 2005. 584 с.
9. Федеральные правила использования воздушного пространства Российской Федерации. Утверждены Постановлением Правительства Российской Федерации от 11 марта 2010 г. № 138.
10. Поспелов Д. А. Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 288 с.

# Особенности эксплуатации и повышение эффективности радиотехнического оборудования для обеспечения полетов вертолетов в горной местности

В условиях горной местности распространение радиоволн имеет свои особенности, что оказывает влияние на работу радиотехнического оборудования: увеличивается погрешность измерительных приборов, ухудшается качество связи и т. п. Это существенно влияет на безопасность полетов. Для организации хорошей связи и эффективной работы радиотехнических средств в горах необходимо грамотное размещения оборудования и планирование маршрутов полета, выбор оптимального способа ретрансляции сигналов, комплексное использование систем навигации, а также наличие опыта эксплуатации оборудования с учетом особенностей горной местности.



**В. М. Дегтярев,**  
доктор техн. наук, профессор,  
главный специалист  
ОАО «Холдинговая компания «Ленинец»



**В. А. Дмитриев,**  
канд. техн. наук, доцент кафедры  
летной эксплуатации  
и профессионального обучения  
авиационного персонала СПбГУ ГА



**Я. М. Далингер,**  
канд. техн. наук, заведующий кафедрой  
прикладной математики, проректор  
по информатизации и региональному  
образованию СПбГУ ГА



**В. Е. Каленов,**  
аспирант кафедры летной  
эксплуатации  
и профессионального обучения  
авиационного персонала СПбГУ ГА