

УДК 629.7.067

DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-6-44-54

## ФОРМИРОВАНИЕ ЧАСТНЫХ КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ А-СДМ С УЧЕТОМ ИНТЕРЕСОВ УЧАСТНИКОВ ПРОЦЕССА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ДИНАМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКЕ

Г.Н. ЛЕБЕДЕВ<sup>1</sup>, В.Б. МАЛЫГИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
г. Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Московский государственный технический университет гражданской авиации,  
г. Москва, Россия*

Работа выполнена при материальной поддержке РФФИ, грант № 19-08-00010

В статье рассматривается процесс совместного управления в аэропортах А-СДМ в динамически изменяющихся условиях производственного процесса, под которым понимается возникновение нештатных ситуаций, способных изменить запланированные действия. В реальном производстве в этом случае появляется большое количество возможных решений по каждой нештатной ситуации, чем ниже уровень учета этих вариантов, тем больше их количество. В данной работе акцент сделан на внешние факторы, существенно влияющие на деятельность авиакомпаний и аэропортов и на соответствующие ответные действия со стороны управления, формализованные в виде пяти пунктов. Актуальность выбора продиктована наличием противоречивых интересов участников процесса. Объективное объяснение в пользу того или иного решения, основанное на минимизации общих потерь от возникновения нештатных ситуаций, позволит значительно укрепить позиции каждого участника процесса. Авторы ввели в математический аппарат ряд обозначений и допущений, перечень которых может дополняться. Сформированы динамические приоритеты для каждого участника процесса. Инструментом оптимизации совместного принятия решений является генетический алгоритм, позволяющий за меньшее число итераций в реальном масштабе времени получить субоптимальное, отвечающее требованиям участников процесса, решение. В качестве примера в статье рассматривается ситуация, которая может возникнуть в реальном процессе производственной деятельности. На основе мультипликативной формы назначается динамический приоритет для задержанных рейсов с учетом противоречивых интересов участников процесса, формируются частные критерии для ранжирования рейсов на каждом шаге перепланирования, применяется генетический алгоритм. В результате получено конкретное решение «нештатной» ситуации, спонтанно возникшей в результате воздействия внешних факторов. Без сомнения, данный математический аппарат имеет перспективы внедрения в производственный процесс, так как любая нештатная ситуация может быть встроена в алгоритм поиска решения с ее учетом.

**Ключевые слова:** совместное принятие решений (СДМ), безопасность полетов, генетический алгоритм, первоочередное обслуживание.

### ВВЕДЕНИЕ

Проведенный анализ взаимодействия в рамках А-СДМ службы управления воздушным движением, аэропортовыми службами и авиакомпаниями убедительно показал наличие противоречий интересов и необходимости совместного управления. В обеспечении приемлемого уровня безопасности воздушного движения заинтересованы все участники процесса. Однако в динамической обстановке, под которой понимаются условия незапланированного ухудшения метеоусловий, временного падения спроса пассажиров на авиаперевозки и непредвиденных отказов техники, проявляются различия интересов [1, 2, 3, 4]. Границы рассматриваемой в статье задачи определяются исходя из ситуации, возникающей под воздействием внешних факторов, которые допускают использование только части ресурсов того или иного участника процесса А-СДМ. В частности, для авиакомпаний стоит задача поиска минимального, но достаточного количества и качества обеспечения расписания в сбойных ситуациях воздушными судами, снижения топливных затрат, затрат расходного материала. В интересах службы управления воздушным движением важно скорейшее погашение возмущения потока движе-

ния ВС [9], для аэропортов важны задачи эффективного использования ресурсов перрона и аэропортового комплекса [7].

Для поиска общего взвешенного решения требуется учет всех интересов (авиакомпаний, аэропорты, службы УВД), которые могут иметь разные измерения и масштабы. Возникает необходимость в нестандартных ситуациях решать задачу перепланирования скоординированных действий и использовать ряд мер, направленных на стабилизацию ситуаций. К их числу в данной работе относятся следующие действия.

1. Приоритетное осуществление вылета в случае тенденции к возникновению дефицита мест стоянок в конкретном аэропорту.

2. Первоочередной выпуск рейсов, имеющих большее время задержки.

3. Оперативное – в полете или до вылета изменение аэродрома назначения в случае невозможности посадки на нем по различным причинам (метеосостояние, технические и т. д.), когда время задержки вылета достигло критического значения. *Например, при закрытии а/д Внуково возможен прилет на а/д Домодедово. При этом пассажиров, имеющих «стыковочные» рейсы, доставят поездом-экспрессом на а/д Внуково, а ожидающих вылет с а/д Внуково аналогичным путем доставят на а/д Домодедово.*

4. Выбор типа ВС (средней вместимости или широкофюзеляжного) и варианта его заправки топливом «в один конец или туда и обратно» в зависимости от спроса пассажиров при вылете и обратном прилете.

5. Сезонное изменение расписания рейсов, в том числе в праздничные и выходные дни.

Подводя предварительный итог, нужно подчеркнуть, что в целом решаемая задача является многокритериальной [6], и каждая из пяти выбранных мер по-разному влияет на эффективность деятельности заинтересованных служб [1]. Для определения эффективности необходимо сформировать количественные оценки как для трех частных критериев, так и для общего критерия оптимального компромисса при принятии решения.

С учетом разнообразия этих действий и ряда негативных факторов введем ряд обозначений:

$i$  – номер аэропорта ( $i = 1 \dots N$ );

$i, g$  – номер аэропортов вылета и прилета соответственно;

$n_i$  – общее число мест на летном поле  $i$ -го аэропорта;

$x_i$  – число свободных мест в  $i$ -м аэропорту;

$u_i$  – число базовых мест на летном поле для стоянки;

$z_i$  – число ВС в воздухе, прибывающих в  $i$ -й аэропорт;

$r$  – номер авиакомпании;

$K$  – номер задержанного рейса ( $K = 1, \dots, L$ );

$l_{i,j}$  – число задержанных рейсов из аэропорта  $i$  в аэропорт  $j$ ;

$\Delta t_{i,j}$  – время задержки в вылете рейса  $i, j$ ;

$T_{i,j}$  – длительность выполнения рейса  $i, j$ ;

$S_{i,j}$  – число пассажиров в рейсе  $i, j$ ;

$S_{j,i}$  – число вылетающих пассажиров обратно;

$C_j = 0, 1$  – альтернатива летной погоды прилета в аэропорт  $j$ ;

$Q_r$  – число ВС, принадлежащих авиакомпании  $r$ ;

$M$  – общее число ВС во всех аэропортах;

$Q = 1, 2$  – тип воздушного судна ( $q = 2$  – широкофюзеляжный);

$Ш_j$  – штрафная (или доходная) функция в зависимости от числа свободных мест на летном поле;

$\Delta_j$  – дополнительные расходы за счет проезда пассажирами части пути на поезде-экспрессе;

$m_0$  – число задержанных рейсов, вылет которых планируется на одном шаге решения задачи;

$R$  – общее число шагов перепланирования задержанных вылетов в сутки;  
 $m_1, m_2, m_3$  – масштабные коэффициенты в мультипликативной свертке частных критериев ранжирования, учитывающие разную значимость противоречивых интересов.

### ПРИНЯТЫЕ ДОПУЩЕНИЯ

1. Задано число  $N$  взаимодействующих аэропортов, причем в текущей ситуации каждый  $i$ -й аэропорт характеризуется числом  $x_i$  свободных мест на летном поле, общим числом  $n_i$  всех мест арендуемых авиакомпаний, числом  $y_i$  «базовых» мест на летном поле и числом  $z_i$  ВС в воздухе, вылетевших в аэропорт, которое не должно превышать значения  $(n_i - x_i)$ . Все эти параметры определяют персональную значимость  $\Pi_1$  первоочередного обслуживания.

2. Задано общее число  $r$  авиакомпаний. В данной работе  $r = 1$ .

3. Задано общее число  $M$  воздушных судов, в том числе и значение  $m_r$  судов, принадлежащих каждой авиакомпании, среди них при  $q = 2$  широкофюзеляжные.

4. Задано общее число  $L$  невыполненных рейсов из-за задержки вылета во всех аэропортах, в частности число  $l_{i,j}$  рейсов из аэропорта  $i$  в аэропорт  $j$ .

Каждый рейс  $i,j$  имеет свой номер  $K$  ( $K = 1, \dots, L$ ) и характеризуется длительностью  $T_{ij}$  выполнения и сложившимися к текущему моменту времени  $\Delta t_{ij}$  задержкой обслуживания, а также числом  $S_{ij}$  пассажиров. Все эти параметры, влияющие на частный персональный приоритет  $\Pi_2$ , можно представить в виде табл. 1, в том числе возможность отказа в посадке из-за метеословий.

Таблица 1  
Table 1

Параметры определения персональной значимости первоочередного обслуживания  
Options to specify the personal relevance of priority services

$K$	$i$	$j$	$n_i$	$x_i$	$z_i$	$y_i$	$n_j$	$x_j$	$z_j$	$y_j$	$T_{ij}$	$S_{ij}$	$q$	$\Delta t_{ij}$	$C_j$	$S_{ji}$
1	1	2	12	2	0	8	10	4	0	3	1	100	2	2	1	100
2	1	3	12	2	0	8	6	0	0	2	4	50	1	1.5	1	100
3	1	4	12	2	0	8	8	6	0	2	2	100	1	3	2	50
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$L$	4	2	6	3	0	3	6	4	0	3	2	50	1	2	1	50

5. Существуют три соображения выбора оптимального плана использования авиационной техники для обеспечения рейсов, каждый из которых характеризуется 16-ю параметрами табл. 1:

- 1) в интересах двух аэропортов  $i$  и  $j$ ;
- 2) в интересах авиакомпании с учетом использования поезда-экспресса;
- 3) в интересах службы УВД, пассажиров, а точнее, с учетом штрафных функций при их неудачном обслуживании.

6. В качестве единого критерия  $I_0$  общей эффективности планирования расписания в данной работе предложена следящая мультипликативная форма:

$$I_0 = \max \sum_{K=1}^L [\Pi_1(i) + m_1][\Pi_2(i, j) + m_2][\Pi_3(i, j, q) + m_3]. \quad (1)$$

Предложенный критерий обладает следующими преимуществами:

- произведение лучше суммы;
- любая физическая размерность сомножителей.

7. В качестве метода численной оптимизации решаемой многокритериальной задачи используется генетический алгоритм (ГА), состоящий из операций, которые являются предметом дальнейших исследований:

- операций скрещивания выбранных вариантов первоначальной «элиты»;
- операций мутации путем перестановки части рейсов местами по времени вылета.

Достоинством этого алгоритма является сокращенное число выбираемых вариантов при скрещивании и мутации по сравнению с полным перебором, хотя результат его работы является субоптимальным. Тем не менее количественная оценка частных критериев  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$ ,  $\Pi_3$  обеспечивает возможность сравнения одних предложенных планов с другими.

### ФОРМИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРИОРИТЕТОВ ДЛЯ ЗАИНТЕРЕСОВАННЫХ СТОРОН

Рассмотрим вопрос назначения динамического приоритета  $\Pi_i^{(i)}$  для каждого аэропорта с учетом двух обстоятельств [6]. Первым и главным из них является текущая ситуация, связанная с наличием свободных мест  $x_i$ , что хорошо для прилета, и занятых мест  $(n_i - x_i)$ . Чем меньше тех или других, тем хуже. Принимая как самую выгодную «седловую точку», равную  $0,5n_i$ , как для  $i$ -го аэропорта вылета, так и  $j$ -го аэропорта прилета, отсутствие факта близости состояния обоих аэропортов от «седловой точки» определяет приоритет пары  $i, j$  в улучшении этой ситуации, поскольку штрафные функции для каждого аэропорта имеют вид

$$\Pi_i = n_i - z_{x_i} - 1; \quad \Pi_j = 2x_j - n_j - 1, \quad (2)$$

а их сумма равна искомому значению

$$\Pi_i + \Pi_j = n_i - n_j + 2(x_j - x_i - 1). \quad (3)$$

В формуле (3) не учтен поток  $z_i$  прибытия к  $i$ -му аэродрому взлета, находящийся в воздухе, поэтому с учетом этого имеем сомножитель

$$\Pi_1 + \Pi_2 = n_i - n_j + 2(x_j - x_i + 0,5z_i - 1). \quad (4)$$

Второе обстоятельство должно учитывать число базовых мест для стоянки ВС на летных полях двух аэропортов,  $y_i$  и  $y_j$ , сдаваемых в аренду, чем их больше, тем лучше и приоритет выше.

Тогда по аналогии с критерием (1) получим свою мультипликативную форму  $\Pi_i$  для каждой пары  $i, j$  вылета и прилета при анализе любого рейса:

$$\Pi_i(i, j) = \max_{u_i(i, j)} \left[ n_i - n_j + 2(x_j - x_i + 0,5z_i - 1 + m_1(1)) \right] \left[ y_i + m_2(1) \right], \quad (5)$$

где  $m_1(1)$  и  $m_2(1)$  – масштабные коэффициенты, учитывающие разную значимость частных сомножителей.

Можно отметить, что критерий  $\Pi_i(i)$ , конечно, учитывает интересы аэропортов, но косвенно и авиакомпании для рейса, обозначенного через  $i$  и  $j$ , и пассажиров этого рейса, правда в ущерб остальным пассажирам.

Рассмотрим теперь приоритет  $\Pi_2$  каждого рейса  $K$  без учета аэропортов прилета и вылета на основе двух своих обстоятельств. Первым и главным обстоятельством является наличие времени  $\Delta t_k$  задержки выполнения рейса – чем оно больше, тем раньше нужно определить вылет. Также важны число пассажиров  $S_k$  и длительность полета  $T_k$ , что в целом приблизительно определяет цену  $S_k \cdot T_k$  и ожидаемый доход. Поэтому получим произведение своих частных сомножителей

$$\Pi_2(K) = \max_{u_2=K} [\Delta t_K + m_1(2)] [S_K T_K + m_2(2)], \quad (6)$$

где  $m_1(2)$  и  $m_2(2)$  – масштабные множители, определяющие различную значимость для двух своих обстоятельств, учитывающих в первую очередь интересы службы УВД и пассажиров, а также авиакомпаний.

Третий случай назначения приоритета  $\Pi_3$  состоит в поддержании расписания (в интересах всех заинтересованных), когда отсутствует возможность произвести посадку на аэродроме назначения крупного аэроузла. В этом случае авиакомпания терпит убытки из-за необходимости доставки пассажиров поездом-экспрессом.

Тогда первый сомножитель  $\Pi_{31}$  искомого приоритета в интересах авиакомпании можно представить следующим специфическим образом:

$$\Pi_{31}(j) = \max_{u_{31}=0,1} \left[ 1 - C_j (1 - u_3 \frac{\Pi_j - \Delta_j}{\Pi_i + \Pi_j}) \right], \quad (7)$$

где  $C_j = 0, 1$  – признак исключения прилета в аэропорт  $j$  ( $C_j = 1$ ) или его разрешение ( $C_j = 0$ );  $\Pi_j$  – штраф за отсутствие достаточного числа имеющихся судов в аэропорту  $j$ , вычисляемый по формуле (2);  $\Pi_i$  – штраф за отсутствие достаточного числа свободных мест в аэропорту  $i$ ;  $\Delta_j$  – дополнительные затраты за железнодорожный (ж/д) проезд от места посадки до пункта  $j$  назначения;  $u_3 = 0, 1$  – принятие решения об отказе ж/д проезда при  $\Pi_j < \Delta_j$  или наоборот.

Эта формула дает простые ответы в следующих случаях:

- $C_j = 0$  – прилет разрешен;
- $\Pi_{31}(j) = 1$  – ни выгоды, ни убытков авиакомпания не несет;
- $C_j = 1$  – прилет в пункт  $j$  запрещен, но  $\Pi_j < \Delta_j$ , т. е. ситуация в аэропорту неплохая, тогда  $u_3 = 0$ ,  $\Pi_{31}(j) = 0$ , т. е. никакого смысла вносить в список вылета рейса  $(i, j)$  не имеется;
- $C_j = 1$ ;  $u_3 = 1$ , если  $\Pi_j > \Delta_j$ , т. е. убытки авиакомпании при железнодорожном проезде явно меньше штрафов за ожидания пассажиров, тогда

$$\Pi_{31} = \frac{\Pi_j - \Delta_j}{\Pi_i + \Pi_j} > 0.$$

Таким образом, есть смысл пойти по пути нового варианта транспортировки пассажиров.

Наконец, последний довод в пользу авиакомпаний состоит в том, что если на рейс  $(i, j)$  есть достаточное число пассажиров туда и обратно, то имеет смысл по соображениям топливной эффективности произвести заправку топлива в оба конца один раз при вылете «туда». Поэтому другой сомножитель  $\Pi_{32}$  имеет вид

$$\Pi_{32} = \max(S_{ij} + S_{ji}).$$

В целом третий динамический приоритет  $P_3$  можно определить по формуле

$$P_3(K) = \max_{u_3} \left[ 1 - C_j \left( 1 - u_3 \frac{III_j - \Delta_j}{III_i + III_j} \right) + m_1(3) \right] [S_{ij} + S_{ji} + m_2(3)], \quad (8)$$

где  $m_1(3)$ ,  $m_2(3)$  – соответственно назначаемые коэффициенты значимости.

На основании формул (5), (6), (8) можно утверждать, что динамический приоритет  $Y_0$  каждого рейса с учетом всех заинтересованных сторон оказывается зависящим от всех параметров, перечисленных в заголовочной строке табл. 1. Эти параметры в течение суток непрерывно меняются до тех пор, пока рейс не будет выполнен, и это справедливо для всех рейсов  $L$ , что указывает на высокую размерность задачи с многошаговым поиском оптимального решения по трем критериям. При вылете из одного аэропорта  $i$  это число должно быть соизмеримо с общим числом  $N$  аэропортов прилета, поэтому примем первое условие:

$$m_0 = N - 1. \quad (9)$$

Соответственно, число шагов решения в течение суток будет равно

$$R = \frac{L}{N - 1}. \quad (10)$$

Количество повторений при выборе числа  $m$  рейсов по трем критериям будет равно  $3Q$ . При их скрещивании с помощью генетического алгоритма получим  $Q = 3^m$ , а при мутации это число сочетаний  $C_{m_0}^{2m} \approx 3^R$ . В итоге оказывается, что генетический отбор на каждом шаге достигает  $10^4$  повторений расчетов при  $R \approx 10$ , что слишком трудоемко при вычислениях, даже для одного аэропорта.

Такими же трудностями обладает версия о скрещивании разных планов вылета между самими аэропортами, но если число  $N > 10$ , то обнаруживается тот же недостаток. Поэтому предпочтение того или иного способа генетического отбора при оптимизации требует дополнительного анализа.

Принимаем длительность шага общих расчетов 1 час, где участвует общее число  $m$  выбираемых рейсов [10].

Решение при возникшем обстоятельстве может быть таким.

1. Объединение нескольких рейсов, имеющих похожие характеристики.
2. Организация генетического отбора вариантов между соседними шагами расчета путем «переноса» ряда первоочередных рейсов на новом шаге в конец списка рейсов на предыдущем шаге, учитывая их принципиальную связь друг с другом, «разорванную» при искусственном разбиении решения на ряд независимых шагов.

Вопрос предпочтения того или иного способа генетического отбора при оптимизации требует дополнительного анализа.

В качестве примера рассмотрим условную картину задержанных рейсов между пятью аэропортами ( $N = 5$ ), похожими на Москву (**М**), Санкт-Петербург (**СПб**), Париж (**П**), Екатеринбург (**Е**) и Симферополь (**С**), как показано на рис. 1.

Согласно условной версии рис. 1 всего в аэропортах расположено на стоянке 17 воздушных судов, равных  $\sum_{i=1}^N m_i$ , и два ВС находятся в воздухе ( $z_1 = 2$ ), вылетов из **Е** и **С**, т. е.  $M = 19$ .

При этом одно ВС, используемое в рейсе  $K = 2$  (показаны стрелками), находилось в неисправном состоянии, из-за чего вылет в **СПб** задержался на время  $\Delta t_2 = 2$  часа.

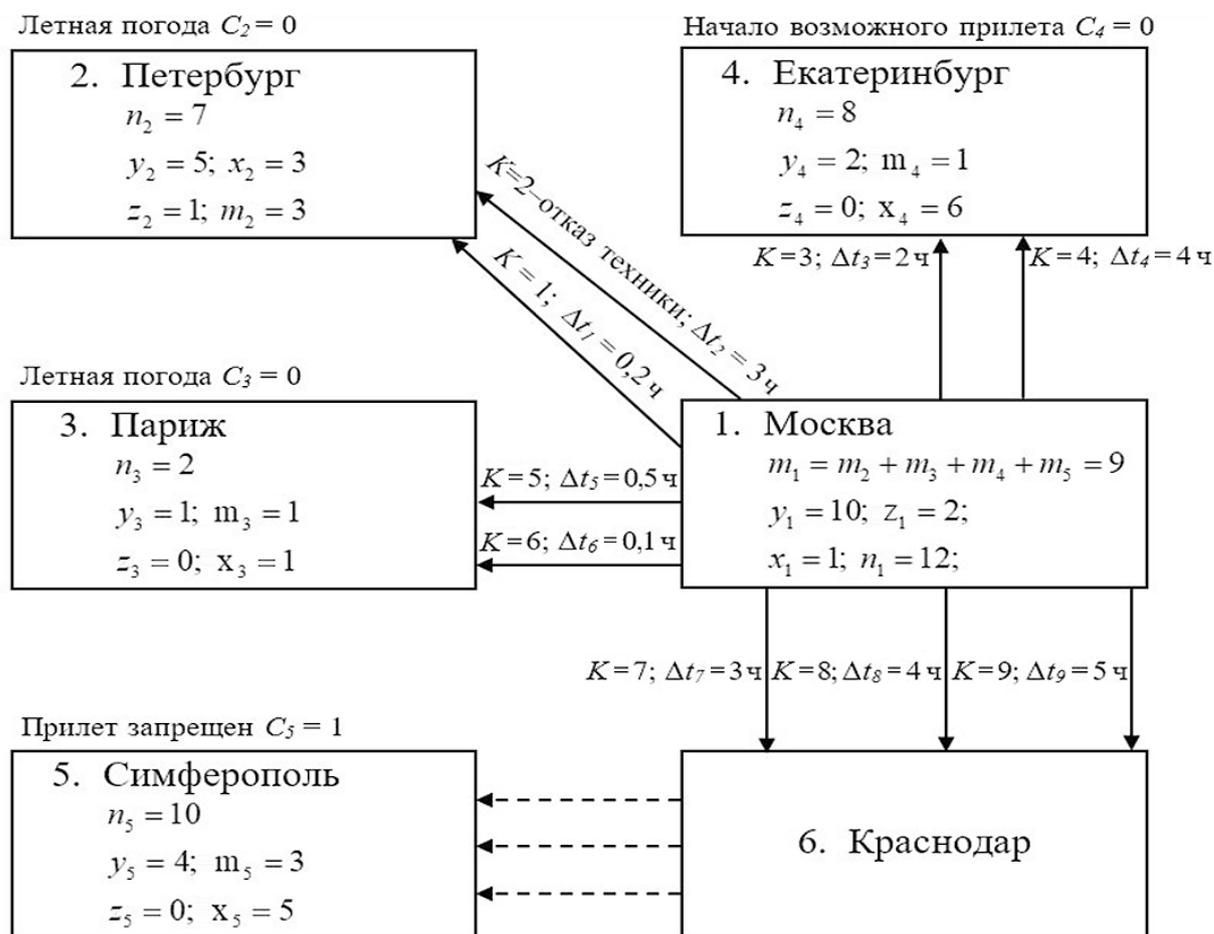


Рис. 1. Условная картина задержанных рейсов ( $L = 9$ ) из  $M$   
Fig. 1. Conditional pattern of delayed flights ( $L = 9$ ) from  $M$

Ситуации при вылете из  $M$  в другие аэропорты выглядят следующим образом.

- Для полетов в **СПб** два средних и два широкофюзеляжных ВС, по-разному используемых в различные сезоны, при этом в штатном состоянии два судна стартуют из **СПб**, другие два – одновременно из  $M$ , и они обмениваются местами четыре раза в сутки. Однако, поскольку из-за отказа техники одно ВС ремонтируется в  $M$ , число свободных мест стоянок там уменьшилось, а приоритет рейса  $K = 2$  из-за задержки повышается.
- Для полетов туристической компании в **П** используется три ВС, причем в **П** одно судно занимает одно место, а другое свободно ( $n_3 = 2, m_3 = 1$ ), зато в  $M$  на перроне стоят два судна – широкофюзеляжное и среднее (одно – в резерве), поэтому по сравнению с **П** число свободных мест в  $M$  на одно меньше, но в целом ситуация благоприятная ввиду летной погоды ( $C_3 = 0$ ).
- Для полетов в **Е** возможность прилета была исключена долгое время, поэтому происходило лишь убывание ВС с летного поля, а время задержки рейсов 3 и 4 из  $M$  достигало существенных значений ( $\Delta t_3 = 2r, \Delta t_4 = 1r$ ), поэтому два ВС остались на летном поле  $M$  (не считая двух своих), а число свободных мест в **Е** достигло критических значений ( $x_4 = 6$ ).

- Наконец, наиболее сложная ситуация сложилась в  $C$ , из-за длительного отказа в приеме судов из остальных аэропортов ( $C_5 = 1$ ). В частности, задержки вылета рейсов 7, 8, 9 достигли максимума ( $\Delta t_7 = 3r$ ,  $\Delta t_8 = 4r$ ,  $\Delta t_9 = 5r$ ), и поэтому просматривается возможность выполнения этих рейсов в Краснодар, а затем – железной дорогой или автобусами. При этом улетевшие из  $C$  суда создают завышенное число  $x_5 = 5$  свободных мест, а прилетевшие в Краснодар суда на это число никак не влияют.

Перечисленные условия должны быть учтены при назначении описанных выше динамических приоритетов  $P_1, P_2, P_3$  на каждом шаге, перед этим в соответствии с приведенными соображениями определим число  $r$  шагов планирования, число рейсов  $m$  на одном шаге, имея следующие исходные данные:

$N = 5$ ;  $L = 9$ , тогда  $m = 4$ ;  $r = 2 \div 3$  шага.

Используя формулы (5)–(8) для вычисления значений  $P_1, P_2, P_3$ , можно установить при специально выбранных масштабных коэффициентах  $m_1, m_2, m_3$ , что номера первоочередных четырех рейсов (т. к.  $m = 4$ ) для различных вариантов назначения приоритетов выглядят так:

- с учетом приоритетов  $P_1$  и  $P_2$  ( $P_3 = 1$ ) получим код 3, 4, 2, 5;
- с учетом приоритетов  $P_1$  и  $P_3$  ( $P_2 > 1$ ),  $u_3 = 1$  – код 9, 8, 3, 2;
- с учетом приоритетов  $P_2$  и  $P_3$  ( $P_1 > 1$ )  $u_3 = 1$  – код 3, 9, 4, 8;
- с учетом всех приоритетов – код 3, 2, 9, 4.

В итоге общий состав первоочередных рейсов, попавших во все планы, выглядит так и состоит из шести номеров: 2, 3, 4, 5, 8, 9.

Произведя различные сочетания этих номеров, число которых равно  $C_4^6 = 15$  (число скрещиваний), и осуществив различные перетасовки каждого сочетания, число которых равно  $4! = 24$ , можно с помощью анализа  $15 \cdot 24 = 360$  вариантов путем генетического отбора получить лучшие из них, используя для этого специальную функцию эффективного отбора «новой элиты» генетического алгоритма. Число этих вариантов невелико из-за малого числа  $N$ . На данный момент выполнение этой задачи в указанных допущениях соответствует коду 3, 2, 9, 4.

Можно перечислить дальнейшие действия перепланирования вылетов для данной задачи.

1. Полученный план выполнения задержанных рейсов совмещается с готовым планом предстоящих вылетов, исключая их совпадения по времени друг с другом. Этот технологический процесс, не представляющий научного интереса, в работе не рассматривается.

2. Далее аналогичным образом составляются планы вылета первоочередных задержанных рейсов для остальных  $(N-1)$  аэропортов на том же шаге перепланирования – для **СПб, П, Е** и **С**.

3. Затем происходит переоценка нового текущего состояния всех аэропортов и оставшейся части задержанных рейсов для перепланирования на новом шаге. Это означает, что практически все параметры в табл. 1 пересчитываются, включая число строк ( $L$  уменьшается), а также число свободных и занятых мест в аэропортах с учетом летевших на посадку ВС и растущего времени задержки в обслуживании пассажиров для рейсов, не попавших в план на предыдущем шаге.

4. Производится перепланирование вылета других задержанных рейсов на новом шаге для всех аэропортов.

5. Осуществляется очередное совмещение нового плана с графиком еще не выполненных пока вылетов.

6. Дополнительно выполняется «состыковка» полученных двух планов на равных шагах перед их воссоединением путем другого генетического отбора ряда вариантов, полученных следующим образом. С целью повышения эффективности совместного использования результатов на соседних шагах предлагается перенести один или два первых номера рейса из списка на новом шаге в конец списка, полученного на предыдущем шаге, а номера рейсов в конце списка на предыдущем шаге отправить в список на новом шаге (т. е. поменять один или два рейса местами). Число

таких переносов будет невелико. Например, при четырех вариантах плана на каждом шаге и переносе как одного, так и двух рейсов получим  $2 \cdot 4^2 = 32$  варианта состыковки.

7. Вычислительные операции на следующих шагах повторяют предыдущие действия до тех пор, пока оставшиеся задержанные рейсы не исчезнут  $L \rightarrow 0$ .

Необходимо заметить, что для генетического отбора вариантов как внутри каждого шага планирования, так и для совмещения между соседними шагами необходим еще один «объективный» критерий  $Y_1$  эффективности любого плана в отличие от критерия  $Y_0$ , предназначенного только для ранжирования рейсов [5]. Этот критерий должен стать интегральной оценкой для всех шагов в течение суток, учитывающей как доходы, так затраты и штрафные функции за некачественное обслуживание пассажиров и техники в воздухе и на земле в аэропортах. Этот критерий предстоит еще сформировать.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена мультипликативная форма назначения динамического приоритета для каждого задержанного рейса, которая оказалась лучше аддитивной формы вследствие одновременного учета противоречивых интересов участников производственного процесса.

2. В виде формул сформированы частные критерии для ранжирования рейсов на одном шаге перепланирования графиков вылета с учетом заинтересованных сторон.

3. Предложен механизм многошагового субоптимального отбора вариантов перепланирования с помощью генетического алгоритма.

4. Для выполнения главной операции генетического отбора при формировании «новой элиты» лучших вариантов необходимо дополнительно сформировать интегральный критерий эффективности с учетом доходов, затрат и штрафных функций за снижение качества обслуживания.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Борсоев В.А.** Принятие решения в задачах управления воздушным движением. Методы и алгоритмы / Г.Н. Лебедев, В.Б. Малыгин, Е.Е. Нечаев, А.О. Никулин, Тин Пхон Чжо; под ред. Е.Е. Нечаева. М.: Радиотехника, 2018. С. 351–415.

2. **Никулин А.О.** Система совместного принятия решений как эффективный инструмент организации работы аэропорта в условиях пиковых нагрузок // Научный вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 5. С. 43–55. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-5-43-55

3. **Никулин А.О., Попов А.А.** Внедрение процедур А-СДМ в аэропорту Шереметьево // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 221. С. 68–80.

4. **Нечаев Е.Е., Никулин А.О.** Анализ работы системы «СИНХРОН» аэропорта Шереметьево в сложных метеорологических условиях // Научный вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 6. С. 31–42. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-6-31-42

5. **Жильцов И.Е., Митрофанов А.К., Рудельсон Л.Е.** Оценка пропускной способности в задаче совместного планирования потоков воздушных судов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 2. С. 83–95. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-2-83-95

6. **Луговая А.В., Коновалов А.Е.** Совместное принятие решения о потоках прилета и вылета ВС при организации воздушного движения // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 4. С. 78–87. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-78-87

7. **Соболь Е.М., Статников Р.Б.** Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Наука, 1981. 110 с.

8. **Рудельсон Л.Е.** Программное обеспечение автоматизированных систем управления воздушным движением. Ч. I. Системное программное обеспечение. Кн. 2. Операционные системы реального времени: учебное пособие. М.: МГТУ ГА, 2008. 96 с.

9. Зайцев А.В., Талиманчук Л.Л. Интеллектуальная система принятия решений для оценки научной деятельности на основе многоагентной системы // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2008. № 7. С. 85–88.

10. Габейдулин Р.Х. Задача динамического регулирования потоков воздушного движения задержками вылетов воздушных судов // Труды ГосНИИ АС. Сер. Вопросы авионики. 2018. № 2. С. 39–53.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Лебедев Георгий Николаевич**, доктор технических наук, профессор кафедры систем автоматического и интеллектуального управления Московского авиационного института (национального исследовательского университета), kaf301@mail.ru.

**Малыгин Вячеслав Борисович**, начальник тренажерного центра кафедры управления воздушным движением МГТУ ГА, mbv898@ya.ru.

## FORMATION OF PRIVATE PERFORMANCE CRITERIA A-CDM TAKING INTO ACCOUNT THE INTERESTS OF THE PARTICIPANTS IN THE DECISION-MAKING PROCESS IN A DYNAMIC ENVIRONMENT

**Georgy N. Lebedev<sup>1</sup>, Vyacheslav B. Malygin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

The study was conducted with support of the Russian Foundation for Basic Research, grant № 19-08-00010

### ABSTRACT

The article describes the process of collaborative management at airports A-CDM in dynamically changing conditions of the productive process, defined as the occurrence of emergency situations capable of altering the planned actions. In real operation, in this case, a large number of possible solutions for each emergency situation appears, the lower the level of recording for these options, the more their number. This paper focuses on external factors that significantly affect the activities of airlines and airports and to the relevant management retaliation formalized in the form of five points. The relevance of the choice is dictated by the presence of conflicting interests of stakeholders. Objective explanation in favor of a decision based on the minimization of the total losses from the outbreak of emergencies would significantly strengthen the position of each participant in the process. The authors have introduced a number of mathematical notations and assumptions, a list of which can be supplemented. Dynamic priorities for each participant in the process are formulated. The tool for optimization of joint decision-making is the genetic algorithm, which allows for a smaller number of iterations in the real time to get suboptimal decision that meets the requirements of the participants in the process. As an example, the article describes a situation that may occur in a real-world production. Based on the multiplicative form a dynamic priority for delayed flights is assigned, taking into account the conflicting interests of the participants in the process, private ranking criteria for flights during each step of the rescheduling are formed, a genetic algorithm is applied. As a result, a specific decision of the emergency situation, arising spontaneously from the impact of external factors is obtained. This mathematical apparatus has prospects of introduction into the productive process as any emergency can be built into the solving algorithm and taken into account.

**Key words:** collaborative decision making (CDM), flight safety, genetic algorithm, priority services.

### REFERENCES

1. Borsoyev, V.A., Lebedev, G.N., Malygin, V.B., Nechayev, Ye.Ye., Nikulin, A.O. and Tin Pkhon Chzho. (2018). *Prinyatie resheniya v zadachakh upravleniya vozдушным движением*.

*Metody i algoritmy* [Decision making in air traffic management tasks. Methods and algorithms], in Nechaev Ye.Ye. (Ed.). Moscow: Radiotekhnika, pp. 351–415. (in Russian)

2. **Nikulin, A.O.** (2018). *The system of collaborative decision making as an effective tool for the organization of the airport operation in peak loads*. Civil Aviation High Technologies, vol. 21, no. 5, pp. 43–55. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-5-43-55. (in Russian)

3. **Nikulin, A.O. and Popov, A.A.** (2015). *Implementation procedures A-CDM at the airport Sheremetyevo*. Nauchnyi Vestnic MGTU GA [Civil Aviation High Technologies], no. 221, pp. 68–80. (in Russian)

4. **Nechaev, E.E. and Nikulin, A.O.** (2018). *The Analytical treatment of the system "SYNCHRON" at Sheremetyevo airport in adverse weather conditions*. Civil Aviation High Technologies, vol. 21, no. 6, pp. 31–42. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-6-31-42. (in Russian)

5. **Zhiltsov, I.E., Mitrofanov, A.K. and Rudelson, L.E.** (2018). *Air space capacity assessment regarding the problem of the collaborative management of air traffic flows*. Civil Aviation High Technologies, vol. 21, no. 2, pp. 83–95. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-2-83-95. (in Russian)

6. **Lugovaya, A.V. and Kononov, A.E.** (2017). *Collaborative decision-making on the inbound and outbound air traffic flow in air traffic management*. Civil Aviation High Technologies, vol. 20, no. 4, pp. 78–87. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-78-87. (in Russian)

7. **Sobol, E.M. and Statnikov, R.B.** (1981). *Vybor optimalnykh parametrov v zadachakh so mnogimi kriteriyami* [Selection of optimal parameters in tasks with many criteria]. Moscow: Nauka, 110 p. (in Russian)

8. **Rudelson L.E.** (2008). *Programmnoe obespechenie avtomatizirovannykh system upravleniya vozдушnym dvizheniem. Chast I. Sistemnoe programmnoe obespechenie. Kniga 2, Operatsyonnye sistemy realnogo vremeni. Matematicheskie modeli* [Software for automated air traffic control systems. Part I. System software. B2. Real-time operating systems. Mathematical models]. Uchebnoe posobie [Training manual]. Moscow: MGTU GA, 96 p. (in Russian)

9. **Zaitsev, A.V. and Talimanchuk, L.L.** (2008). *Intellektualnaya sistema prinyatiya resheniy dlya otsenki nauchnoy deyatel'nosti na osnove mnogoagentnoy sistemy* [Intellectual decision-making system for the evaluation of scientific activity based on a multi-agent system]. Journal Neurocomputers, no. 7, pp. 85–88. (in Russian)

10. **Gabeydulin, R.Kh.** (2018). *The Dynamic Air Traffic Flow Management by Assigning Ground Flight Delays*. Trudy GosNII AS.[Proceedings of State Scientific Research Institute of Aviation Systems] Seriya: Voprosy avioniki [Series: Avionics Issues], no. 2, pp. 39–53. (in Russian)

## INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Georgy N. Lebedev**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Automatic and Intellectual Management Systems Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University), kaf301@mail.ru.

**Vyacheslav B. Malygin**, Head of the Training Center of the Air Traffic Management Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, mbv898@ya.ru.

Поступила в редакцию 01.07.2019  
Принята в печать 14.11.2019

Received 01.07.2019  
Accepted for publication 14.11.2019