

УДК 629.7.067

DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-6-53-64

## 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)

Рассматривается задача совместного управления производственным процессом на авиапредприятиях (СДМ) в динамически изменяющихся условиях возникновения нештатных ситуаций, вносящих изменения в план действий. В производственном процессе в силу разной направленности решаемых задач решение может потребовать перебора как большого, так и малого количества возможных вариантов решения. В статье представлен конкретный пример подобной ситуации, затрагивающей традиционные три службы авиационного комплекса, имеющие каждый свои интересы в общем производственном процессе. Решением такой задачи является единственный вариант в пользу общего производственного процесса. Для этого введен ряд обозначений и допущений, перечень которых может дополняться. Определены динамические приоритеты для каждого участника процесса. Оптимизация совместного принятия решений может быть достигнута как простым перебором вариантов решения, так и при помощи генетического алгоритма, который позволяет за меньшее число итераций в реальном масштабе времени получить субоптимальное, отвечающее требованиям участников процесса решение. В приведённом примере рассматривается ситуация, возникающая на реальном предприятии из-за плохих метеорологических условий. Так, экспертным путем назначаются динамические приоритеты на основе мультипликативной формы для задержанных рейсов с учетом интересов участников процесса, формируются частные критерии для ранжирования рейсов на каждом шаге перепланирования, применяется генетический алгоритм. В результате получено четыре варианта решения «сбойной» ситуации, возникшей в результате воздействия внешних факторов. Первые три варианта соответствуют интересам трех заинтересованных сторон, а четвертый – консолидированный. Все варианты решения оказались различными, что говорит о необходимости применения объективного и обоснованного аппарата принятия решения при совместном управлении производственным процессом. Предлагаемый математический аппарат обладает такой способностью и имеет перспективы внедрения.

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

### ВВЕДЕНИЕ

Существует ряд негативных факторов, способных затруднить производственную деятельность в рамках А-СДМ служб управления воздушным движением, аэропортовых служб и авиакомпаний. К ним в первую очередь относятся сложные погодные условия, технические отказы оборудования, падение спроса на авиаперевозки и ряд других факторов. При этом закрытие по погодным условиям крупных регионов страны в данной статье не рассматривается.

Так, закрытие аэропорта в результате грозовой деятельности на полчаса может привести к существенному увеличению потока прибывающих воздушных судов (ВС), что создаёт угрозу безопасности полетов при управлении воздушным движением. Воздушные суда выбиваются из расписания и вынуждены тратить больше топлива, аэропорты сталкиваются с проблемой отсутствия стоянок для прибывающих ВС, так как вылет с закрытого аэродрома тоже не производится. При определённых условиях становится велика вероятность возникновения коллапса [1]. В подобных случаях, а также во многих других типах сбойных ситуаций, требуется оперативное, оптимальное перепланирование [2–5, 6, 7] использования воздушных судов, мест стоянок в аэропортах для сохранения общего расписания выполнения полётов.

Для решения этой задачи требуется учитывать:

- необходимость сохранения расписания с учетом задержек и намеченных дополнительных рейсов;
- непредсказуемые нарушения в балансе числа занятых воздушных судов авиакомпаний;
- множество критериев учета интересов авиакомпаний, аэропортов и управления воздушным движением [8–13];
- большую размерность задачи по числу ситуаций вследствие задержек рейсов и соответствующего реагирования со стороны служб управления воздушным движением и аэропорта.

В статье рассмотрена конкретная задача перепланирования задержанных рейсов на фоне выполнения штатного расписания при возникновении нелётной погоды в аэропорту или аэроузле. Для решения используется генетический алгоритм, где специально формируются динамические приоритеты для ранжирования рейсов и выбора «элиты» в целях устранения задержек в обслуживании при допущениях, приведенных в [4].

С учетом разнообразия действий и ряда влияющих негативных факторов введем обозначения:

$M$  – всего аэропортов, включая аэропорты, закрытые по метеоусловиям;

$i = 1 \dots M$  – номер аэропорта при вылете;

$j = 1 \dots M$  – номер аэропорта прилета;

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

$l_i$  – число свободных мест стоянок на летном поле в  $i$ -м аэропорту;

$d_i$  – число свободных для выполнения полета воздушных судов в  $i$ -м аэропорту;

$\zeta_j$  – число свободных мест стоянок в  $j$ -м аэропорту;

$S_j$  – число свободных ВС для вылета из аэропорта  $j$ .

Параметры задержанных рейсов:

$p = 1 \dots N$  – номер задержанного рейса, где  $N$  – общее число задержанных рейсов.

$\tau_p$  – время задержки  $p$ -го рейса;

$X_p$  – число пассажиров  $p$ -го рейса;

$r_{ij}$  – расстояние между аэропортом  $i$  и аэропортом  $j$ ;

$r_{\max}$  – максимальное расстояние между двумя аэропортами.

Остальные параметры:

$n_k$  – число задержанных и незапланированных рейсов на  $k$ -м шаге планирования, где  $k$  – номер шага планирования в задаче ликвидации отставания от расписания;

$b_p$  – априорная важность каждого рейса,

где  $b_p = \begin{cases} 1 & \text{при } p \neq R \\ b_{\max} & \text{при } p = R \end{cases}$ , а  $b_{\max}$  – максимальная важность для рейса;

$q$  – номер заинтересованной стороны в устранении отставания;

$q = 1$  – номер варианта решения в интересах управления воздушным движением;

$q = 2$  – номер варианта решения в интересах аэропорта;

$q = 3$  – номер варианта решения в интересах авиакомпании.

## ПРИНЯТЫЕ ДОПУЩЕНИЯ И ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ

Поставленная задача решается при следующих условиях:

1. Процесс перепланирования относится только к задержанным рейсам на фоне выполнения базового расписания остальными рейсами.

2. Все задержанные рейсы разбиваются на пары прилёта и вылета в двух аэропортах. При этом время вылета стремится к времени прилета по паре задержанных рейсов, а число свободных мест стоянок и свободных ВС сохраняется.

3. Под аэропортами  $AЭ_i$  или  $AЭ_j$  понимаются транспортные узлы, которые образуют полностью связанную сеть взаимодействия друг с другом по принципу «каждый с каждым». Это

означает, что каждый  $AЭ_j$  ожидает задержанного прилетного рейса из  $(M-1)$  аэропортов  $AЭ_i$  и предлагает заявку принять задержанный рейс наряду с остальными.

4. Каждый  $AЭ_i$  характеризуется четырьмя параметрами: значениями  $l_i$  и  $d_i$  в качестве пункта вылета и значениями  $\zeta_i$  и  $S_j$  в качестве пункта прилёта для принятия общего решения о составе принимаемых задержанных рейсов из разных аэропортов.

5. На динамические приоритеты задержанных рейсов влияют три заинтересованные стороны:

- при  $q=1$  заинтересованность служб управления воздушным движением в минимизации сбоев в расписании, в исключении возмущения потока движения воздушных судов, в снижении общего времени задержки выполнения базового расписания;

- при  $q=2$  заинтересованность аэропорта в сохранении работоспособности, в отсутствии дефицита мест стоянок для прибывающих ВС, отсутствие скопления ВС на «предварительном старте» (очереди) на вылет;

- при  $q=3$  заинтересованность авиакомпании в сокращении времени пребывания ВС на земле, в увеличении времени полета по маршруту.

6. При этих условиях требуется:

- разработать с учетом высокой размерности задачи численной оптимизации эффективный генетический алгоритм выбора первоочередных задержанных рейсов на первых шагах «эволюции»;

- сформировать с учетом многокритериальности задачи правила назначения динамических приоритетов каждого рейса по нескольким частным критериям для их ранжирования, а также общий критерий отбора лучших вариантов «потомков» на очередном шаге эволюции;

- сформировать процедуру получения множества «приоритетных» рейсов для их последующего «скрещивания» и «мутации»;

- привести пример решения задачи оперативного планирования и оценить число шагов оптимизации в зависимости от числа  $M$  и длительности нелётной погоды на одном из аэродромов.

Предлагаемый подход к решению задачи состоит в последовательном выполнении следующих действий:

1. Первоначально на первом шаге планирования для  $AЭ_j$ , закрытого из-за нелётной погоды, формируется заявка на вылет в остальные  $M-1$  аэропортов в виде трёх ранжированных по разным критериям списков задержанных рейсов. Эти списки попадают в каждый  $AЭ_i$  для их последующего объединения и анализа.

2. Решается главная задача формирования первоначального списка прилёта для  $AЭ_j$ , имеющего свободные стоянки, из полученных трёх вариантов заявок по  $M-1$  аэропортам. В каждой заявке может содержаться как один, так и несколько задержанных рейсов из  $AЭ_i$  (табл. 1).

Максимальное число  $Q$  анализируемых вариантов, составленных из этих заявок, можно оценить по формуле:

$$Q = 3^{M-1}. \tag{1}$$

**Таблица 1**  
**Table 1**

Картина распределения задержанных рейсов на момент возобновления полетов  
Picture of the distribution of delayed flights at the time of flight resumption

К	$i=1$	$i=2$	...	$j-1$	$j+1$	$M_n$
$q=1$	$\Pi_1, \Pi_2 \dots \Pi_n$	$\Pi_{n+1}, \Pi_{n+2} \dots \Pi_{2n}$	...	$\Pi_{(j-2)n+1}, \Pi_{(j-2)n+2} \dots \Pi_{(j-1)n}$	$\Pi_{jn+1}, \Pi_{jn+2} \dots \Pi_{jn}$	$\Pi_{(M-1)n+1}, \Pi_{(M-1)n+2} \dots \Pi_{(M-1)n+n}$
$q=2$	$\Pi_1, \Pi_2 \dots \Pi_n$	$\Pi_{n+1}, \Pi_{n+2} \dots \Pi_{2n}$	...	$\Pi_{(j-2)n+1}, \Pi_{(j-2)n+2} \dots \Pi_{(j-1)n}$	$\Pi_{jn+1}, \Pi_{jn+2} \dots \Pi_{jn}$	$\Pi_{(M-1)n+1}, \Pi_{(M-1)n+2} \dots \Pi_{(M-1)n+n}$
$q=3$	$\Pi_1, \Pi_2 \dots \Pi_n$	$\Pi_{n+1}, \Pi_{n+2} \dots \Pi_{2n}$	...	$\Pi_{(j-2)n+1}, \Pi_{(j-2)n+2} \dots \Pi_{(j-1)n}$	$\Pi_{jn+1}, \Pi_{jn+2} \dots \Pi_{jn}$	$\Pi_{(M-1)n+1}, \Pi_{(M-1)n+2} \dots \Pi_{(M-1)n+n}$

Как видно из табл.1, распределение задержанных рейсов производится с учетом различных интересов. Каждый рейс имеет свой собственный приоритет  $\Pi_p$ , где  $p = 1 \dots M_n$ .

Выражение 1 означает, что при числе  $M > 10$  количество вариантов задачи может варьироваться от  $10^4$  до  $10^6$ , что делает невозможным использование метода полного перебора для больших значений  $M$ .

3. Из полученного множества вариантов выбирается вариант комплексирования первоочередных рейсов прилёта, число которых равно  $l_j$  свободных стоянок на летном поле  $AЭ_j$ . Для этого используется специальный генетический алгоритм с учётом следующих примечаний:

- первоначальными «предками» являются три представителя (по числу интересов), содержащие приоритетные рейсы из всех списков, а число элементов в каждом представителе равно  $l_j$ ;

- число блоков (укрупнённых элементов), на которые делится каждый представитель, для сокращения вычислений может быть равно либо  $(M-1)$ , если  $M-1 \ll l_j$ , либо взято равным постоянному числу  $V = 2 \div 4$ , чтобы блок содержал не один рейс;

- блоки «скрещиваются» для получения «потомков», а для замены рейсов одного и того же аэропорта на другие применяется «мутация». При последующем «скрещивании» этих блоков необходимое число «пострадавших» аэропортов может отсутствовать. При этом количество шагов ГА увеличивается незначительно;

- после каждого шага планирования, который завершается выполнением задержанного рейса, количество таковых быстро сокращается. При малой размерности задачи целесообразно использовать полный перебор анализируемых вариантов вместо ГА;

- главной операцией ГА является отыскание наилучшего варианта, удовлетворяющего общему критерию, который учитывает требования всех заинтересованных сторон.

4. После назначения очередности всем рейсам в  $AЭ_j$  аналогично решается задача для остальных  $M-1$  аэропортов на первом шаге оптимизации, после которого в новом состоянии окажутся все параметры аэропортов и сократится число необслуженных рейсов. При этом время ожидания, как отдельный параметр, будет увеличиваться.

На новом шаге потребуется повторение перечисленных действий, а число таких шагов согласно исследованиям подобного рода задач [4, 6, 14, 15] обычно невелико и соответствует числу задержанных рейсов из одного аэропорта.

Формирование первоначальной «элиты» задержанных рейсов одного аэропорта осуществляется при назначении специальных динамических приоритетов с выполнением численной оптимизации на нескольких шагах планирования.

В отличие от известного аддитивного критерия назначения приоритетов мультипликативная форма свёртки множества учитываемых показателей рассчитывается по формуле [4]:

$$\Pi_p = \max (Y_{1p+m_1}) \dots (Y_{Cp+m_C}) \dots (Y_{wp+m_w}), \quad (2)$$

где  $\Pi_p$  – вычисляемый динамический приоритет;

$C = 1 \dots w$  – номер учитываемого показателя;

$W$  – общее число показателей;

$Y_{Cp} = \frac{\lambda_C}{\lambda_{max}}$  – нормированное безразмерное значение показателя,

здесь  $\lambda_C$  – значение показателя рейса в физических единицах,  $\lambda_{max}$  – максимальное значение показателя;

$m_C$  – коэффициент значимости показателя  $C$ , назначаемого экспертом.

Проведенные исследования [9, 15] подтверждают утверждение о том, что:

- мультипликативная форма эффективнее аддитивной. Действительно, если хотя бы один из множителей в формуле (2) невелик, приоритет сразу уменьшится. Поэтому формула (2) позволяет избежать «узкие места» в системе;

- относительная значимость каждого множителя определяется значением весового коэффициента  $m_C$ , чем  $m_C$  меньше, тем выше влияние показателя  $\lambda_C$ , а при  $m_C \rightarrow \infty$  это влияние исчезает.

Пользуясь этим обстоятельством, можно рассмотреть варианты назначения приоритетов для разных заинтересованных сторон, изменяя нужным образом коэффициенты  $m_C$  для следующего полного перечня показателей:

$$\lambda_w = (b_p, \tau_p, x_p, r_p, d_i, l_i, S_j, \zeta_j); w=8.$$

При  $q=1$  (интересы организации воздушного движения) получаем следующие приоритеты:

$$P_p = \max b_p \left( \frac{\tau_p}{\tau_{max}} + m_1 \right) \left( \frac{x_p}{x_{max}} + m_2 \right) \left( \frac{r_{min}}{r_{max}} + m_3 \right). \quad (3)$$

Выражение (3) означает, что ситуация на лётном поле в аэропорту в меньшей степени затрагивает интересы организации воздушного движения, поэтому коэффициенты  $m_5, m_6, m_7, m_8 \rightarrow \infty$ .

Значение остальных перечисленных в (3) множителей можно истолковать следующим образом:

- априорная важность  $b_p$  действует как масштабный коэффициент;
- наиболее значимыми являются первый и второй множители, поэтому значения коэффициентов  $m_1$  и  $m_2$  минимальны, и в качестве экспертной оценки им можно присвоить значения  $m_1 = 0,1$ , и  $m_2 = 0,1$ . Последний множитель подчёркивает актуальность времени полёта, т.е., чем меньше расстояние  $r_p$  до аэропорта назначения, тем раньше освободятся ВС для выполнения следующего рейса. Аналогично предыдущим коэффициентам значение  $m_3$  можно принять равным  $0,4 \div 1$ .

При  $q=2$  (интересы аэродромных служб) получаем следующие приоритеты:

$$P_p = \max b_p \left( \frac{1}{1+l_i} + m_4 \right) \left( \frac{\zeta_i}{L_i} + m_5 \right) \left( \frac{r_{min}}{r_p} + m_3 \right) \left( \frac{\tau_p}{\tau_{max}} + m_1 \right). \quad (4)$$

Объясняется формула (4) следующим образом:

- наиболее значимыми являются два показателя  $l_i$  – число свободных мест стоянок на лётном поле в  $i$ -м аэропорту и  $\zeta_j$  – число свободных мест стоянок в  $j$ -м аэропорту. Чем меньше  $l_i$  и больше  $\zeta_j$ , тем лучше для аэропортовых служб. По аналогии с коэффициентами формулы (3) присвоим им значения  $m_4 = 0,1$  и  $m_5 = 0,1$ . Третий и четвертый множители формулы (4) введены для учета возможности быстрого получения свободных ВС для избежания дополнительных затрат на обслуживание задержанных пассажиров в аэровокзале и т.п.

Значения  $m_3$  и  $m_1$  в формуле (4) можно принять равными  $0,4 \div 1$ .

При  $q=3$  (интересы авиакомпаний) получаем следующие приоритеты:

$$P_p = \max b_p \left( \frac{d_i}{L_i} + m_6 \right) \left( \frac{1}{1+S_j} + m_7 \right) \left( \frac{r_{min}}{r_p} + m_3 \right), \quad (5)$$

где значения  $m_6$  и  $m_7$  минимальны,  $m_6 = m_7 = 0,1$ , а  $m_3 = 0,4 \div 1$ .

Главное внимание уделяется коэффициенту использования воздушных судов как отношение полётного времени к времени стоянки на перроне аэропорта. Также важна и априорная значимость рейса.

Используя формулы (3–5), получаем множество «предложений» по выбору нужной группы задержанных рейсов. Для выбора наилучшего варианта необходим единый критерий  $\mathcal{F}_p$ , учитывающий все восемь показателей  $\lambda_w$ . Их значимость зависит от сбалансированного мнения

экспертов, однако в первом приближении все значения  $m_{i \rightarrow j} = 0,1$ . Подставив значения в формулу с описанными ранее операторами, имеем:

$$\mathcal{F}_p = \max b_p \left( \frac{\tau_p}{\tau_{max}} + 0,1 \right) \left( \frac{x_p}{x_{max}} + 0,1 \right) \left( \frac{r_{min}}{r_{max}} + 0,1 \right) \left( \frac{d_i}{L_i} + 0,1 \right) \left( \frac{1}{1+l_i} + 0,1 \right) \left( \frac{1}{1+s_j} + 0,1 \right) \left( \frac{\zeta_i}{L_i} + 0,1 \right) \quad (6)$$

При наличии множества «пострадавших» аэропортов начинаем производить выбор с закрытого по метеоусловиям, а далее по уменьшению расстояния между аэропортами. Такой подход соответствует хорошо зарекомендовавшему себя в похожих задачах минимаксного критерия выбора [10, 13]. В первую очередь отслеживаются наиболее сложные ситуации, сложившиеся после определённого воздействия. Данный подход в определённых ситуациях может снижать размерность задачи, что позволяет перейти к полному перебору вариантов решения.

### ПРИМЕР ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЗАДЕРЖАННЫХ РЕЙСОВ

В качестве примера рассмотрим решение задачи малой размерности по числу задержанных рейсов для четырёх аэропортов ( $M = 4$ ). По условию аэропорт  $M_1$  был закрыт на приём по погодным условиям. В каждом аэропорту имеется ограниченное количество мест стоянок  $L_i$ :

$$L_1=8, L_2=8, L_3=7, L_4=7.$$

По плану было необходимо выполнить тринадцать пар рейсов двадцатью шестью воздушными судами, из них три пары между  $M_1$  и  $M_2$  и по две пары между остальными аэропортами. В начальном состоянии имелось по одной свободной стоянке в каждом аэропорту  $l_1 = 1, l_2 = 1, l_3 = 1, l_4 = 1$ .

После закрытия аэропорта  $M_1$  задержано три пары рейсов между  $M_1$  и  $M_2$ , две пары между  $M_1$  и  $M_3$ , две пары между  $M_1$  и  $M_4$ . Оставшиеся шесть пар рейсов выполняются по плану. Ситуация представлена на рис 1,

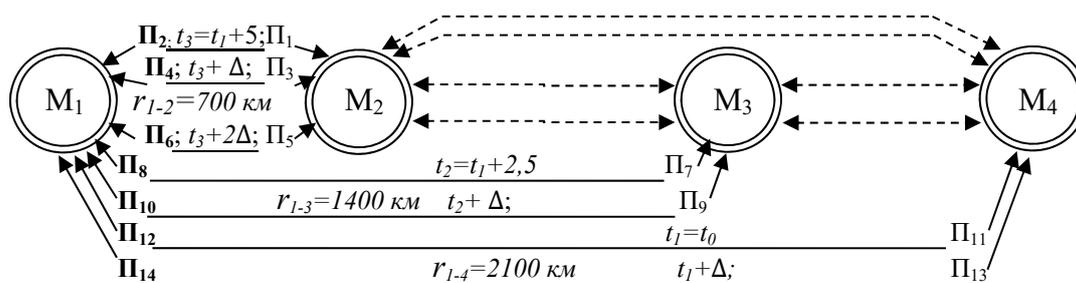


Рис. 1. Ситуация с задержками рейсов по аэропорту  $M_1$   
Fig. 1. The situation with flight delays at  $M_1$  airport

где  $t_1, t_2, t_3$ , – время вылета по расписанию соответственно из аэропортов  $M_4, M_3, M_2$ ;  
 $\Delta$  – время между соседними рейсами.

Каждый рейс обозначен расчётным приоритетом  $\Pi_p$ , нечётные номера  $\Pi_1, \Pi_3$ , и т. д. обозначают вылетные рейсы из  $M_1$ , а четные (наиболее актуальные) – прилётные (выделены жирным шрифтом на рис.1). Два рейса –  $\Pi_5$  и  $\Pi_6$  имеют приоритет  $\textcircled{R}$ , т. е.  $b_5 = b_6 = 2$ , для остальных рейсов  $b_p = 1$ .

После закрытия аэропорта  $M_1$  в связи с метеорологическими условиями считаем, что в течение 7–8 часов на этот аэропорт полёты выполняться не могут, а из него – могут с определёнными ограничениями. Так предположим, что через 3–4 часа после прекращения прилёта из  $M_1$  удалось выпустить рейсы  $\Pi_7$  и  $\Pi_{13}$  в  $M_3$  и  $M_4$  соответственно, что крайне важно, т.к. увели-

числось количество свободных стоянок в  $M_1$ . Итак, новые значения количества свободных мест стоянок в аэропортах через 3–4 часа будут  $l_1 = 3, l_2 = 1, l_3 = 0, l_4 = 0$ .

Исходные данные для вычисления приоритетов задержанных рейсов для  $M_1$  представлены в табл. 2.

Таблица 2  
Table 2

Данные по прилетающим рейсам в аэропорт  $M_1$   
Data on arriving flights to  $M_1$  airport

$p$	$b_p$	$\tau_p, \text{ч}$	$x_p, \text{пас.}$	$r_p, \text{км}$	$d_i$	$l_i$	$S_i$	$\zeta_i$
2	1	3,2	200	700	3	1	3	3
4	1	2	300	700	3	1	3	3
6	2	0,8	200	700	3	1	3	3
8	1	5	200	1400	2	0	3	3
10	1	3,5	300	1400	2	0	3	3
12	1	7,5	200	2100	2	0	3	3
14	1	6	300	2100	2	0	3	3

Для формирования первоначальной «элиты» задержанных рейсов вычислим динамические приоритеты с учетом каждой из заинтересованных сторон, затем ранжируем полученные варианты. В табл. 3 представлены результаты вычислений множителей формулы (3) по приоритетам семи рейсов с учетом интересов организации ВД.

Таблица 3  
Table 3

Результаты вычислений приоритетов при  $q = 1$   
The results of the calculations are prioritized at  $q=1$

$P_p^q$	$b_p$	$0,1 + \frac{\tau}{8}$	$0,1 + \frac{x}{300}$	$\frac{700}{r} + 0,4$	ИТОГ
$P_2^1$	1	0,5	0,7	1,4	0,5
$P_4^1$	1	0,75	1,1	1,4	<b>0,7</b>
$P_6^1$	2	0,2	0,7	1,4	0,24
$P_8^1$	1	0,7	0,7	0,9	0,45
$P_{10}^1$	1	0,5	1,1	0,9	<b>0,55</b>
$P_{12}^1$	1	1,0	0,7	0,75	0,42
$P_{14}^1$	1	0,85	1,1	0,75	<b>0,6</b>

По итогам вычислений видно, что в тройку рейсов с наибольшим приоритетом (по убыванию) входят  $P_4, P_{14}$  и  $P_{10}$ . Полученный результат объясняется влиянием факторов сбоя в организации воздушного движения.

В табл. 4 представлены результаты вычислений множителей формулы (4) по приоритетам предыдущих семи рейсов с учетом интересов аэропортовых служб.

Таблица 4  
Table 4

Результаты вычислений приоритетов при  $q = 2$   
The results of the calculations are prioritized at  $q=2$

$P_p^q$	$0,1 + \frac{1}{1+l_i}$	$0,1 + \frac{\zeta_j}{7}$	$0,4 + \frac{700}{r}$	$0,4 + \frac{\tau}{7}$	ИТОГ
$P_2^2$	0,6	0,5	1,4	0,8	0,33
$P_4^2$	0,6	0,5	1,4	0,65	0,27

Продолжение таблицы 4  
Continuance of Table 4

$\Pi_6^2$	0,6	0,5	1,4	0,5	0,21
$\Pi_8^2$	1,1	0,5	0,9	1,11	<b>0,54</b>
$\Pi_{10}^2$	1,1	0,5	0,9	0,9	0,44
$\Pi_{12}^2$	1,1	0,5	0,75	1,3	<b>0,52</b>
$\Pi_{14}^2$	1,1	0,5	0,75	1,15	<b>0,46</b>

В итоге произведённых вычислений (табл. 4) выделена тройка рейсов с наибольшим приоритетом (по убыванию)  $\Pi_8, \Pi_{12}, \Pi_{14}$ . Полученные результаты объясняются влиянием на сбойную ситуацию ресурсов аэропорта.

В табл. 5 представлены результаты вычисления множителей формулы (5) по приоритетам предыдущих семи рейсов с учетом интересов авиакомпаний.

Таблица 5  
Table 5

Результаты вычислений приоритетов при  $q = 3$   
The results of the calculations are prioritized at  $q=3$

$\Pi_p^q$	$b_p$	$0,1 + \frac{d_i}{7}$	$0,1 + \frac{1}{1+s_j}$	$0,4 + \frac{700}{r}$	ИТОГ
$\Pi_2^3$	1	0,5	0,35	1,4	<b>0,22</b>
$\Pi_4^3$	1	0,5	0,35	1,4	<b>0,22</b>
$\Pi_6^3$	2	0,5	0,35	1,4	<b>0,49</b>
$\Pi_8^3$	1	0,4	0,35	0,9	0,14
$\Pi_{10}^3$	1	0,4	0,35	0,9	0,14
$\Pi_{12}^3$	1	0,4	0,35	0,75	0,2
$\Pi_{14}^3$	1	0,4	0,35	0,75	0,2

Аналогично предыдущим вычислениям из табл. 5 выделяем три рейса с большими приоритетами, это  $\Pi_6, \Pi_4$  и  $\Pi_2$ .

В итоге на три свободных места аэропорта  $M_1$  на первом шаге решения претендуют все семь рейсов – ( $\Pi_2, \Pi_4, \Pi_6$  из  $M_2$ ), ( $\Pi_8, \Pi_{10}$  из  $M_3$ ) и ( $\Pi_{12}, \Pi_{14}$  из  $M_4$ ), при этом каждый имеет собственный объективный приоритет. По формуле  $C_7^3 = \frac{7!}{3!4!}$  получаем 35 возможных сочетаний вариантов решения.

Используя обобщённый критерий  $\mathcal{F}_p$  (6), определим группу из трех рейсов с максимальной суммой по этому критерию. Данные вычислений представлены в табл.6.

Таблица 6  
Table 6

Результаты вычислений обобщённых приоритетов по задержанным рейсам  
The results of the calculations of generalized priorities for delayed flights

$\Pi_p$	$b_p$	$0,1 + \frac{\tau}{8}$	$0,1 + \frac{x}{300}$	$\frac{r_{min}}{r_{max}} + 0,1$	$\frac{d_i}{L_i} + 0,1$	$\frac{1}{1+l_i} + 0,1$	$\frac{1}{1+s_j} + 0,1$	$\frac{\zeta_i}{L_i} + 0,1$	$\mathcal{F}_p$	№
$\Pi_2^{1-3}$	1	0,5	0,7	1,1	0,85	0,6	0,35	0,5	0,19	<b>2</b>
$\Pi_4^{1-3}$	1	0,75	1,1	1,1	0,85	0,6	0,35	0,5	0,21	<b>1</b>
$\Pi_6^{1-3}$	2	0,2	0,7	1,1	0,85	0,6	0,35	0,5	0,18	4
$\Pi_8^{1-3}$	1	0,7	0,7	0,5	0,4	1,1	0,35	0,5	0,13	7
$\Pi_{10}^{1-3}$	1	0,5	1,1	0,5	0,4	1,1	0,35	0,5	0,145	5
$\Pi_{12}^{1-3}$	1	1,0	0,7	0,45	0,4	1,1	0,35	0,5	0,14	6
$\Pi_{14}^{1-3}$	1	0,85	1,1	0,45	0,4	1,1	0,35	0,5	0,185	<b>3</b>

В результате вычислений (табл. 6), не используя ГА, удаётся найти лучшую комбинацию выполнения задержанных рейсов в  $M_1$  – это  $P_4$ ,  $P_2$  и  $P_{14}$ .

В табл. 7 представлены шаги планирования прилета и вылета после возобновления полетов на  $M_1$ .

Таблица 7  
Table 7

Планирование прилета и вылета с момента нормализации условий полета  
Arrival and departure planning from moment the flight conditions are normalized

Пошаговое решение	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$	$p_6$	$p_8$	$p_9$	$p_{10}$	$p_{11}$	$p_{12}$	$p_{14}$
1	3	1	0	0		$P_2$		$P_4$								$P_{14}$
	0	3	0	1	$P_1$		$P_3$		$P_5$					$P_{11}$		
2	3	0	0	1						$P_6$	$P_8$		$P_{10}$			
	0	1	2	0								$P_9$				
3	1	1	1	0											$P_{12}$	
	0	1	1	1												

Из табл. 7 видно, что при заявленных исходных данных достаточно трех шагов для решения задачи с помощью простого перебора вариантов. Основным ограничением при решении задачи является наличие стоянок в аэропортах для приёма ВС. Преимуществом данного алгоритма является объективность, позволяющая решать подобные задачи автоматически без участия человека-оператора. В качестве недостатка следует отметить субъективный характер назначения коэффициентов значимости показателей  $m_c$ , но при использовании алгоритма на практике данный недостаток может легко корректироваться.

В динамической обстановке при организации совместного управления авиационным комплексом для ликвидации негативных последствий сбойных ситуаций требуется использовать систему планирования по текущему состоянию. Системообразующей компонентой такого планирования является приоритетное обслуживание, включая высокий рейтинг отдельных рейсов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведённых исследований можно сделать следующие выводы.

1. Для назначения первоочередности задержанных рейсов предлагается ранжировать их множество с помощью частных динамических приоритетов при объективном учете интересов различных участников процесса.
2. При выборе окончательного варианта задержанных рейсов предложена комплексная мультипликативная форма критерия его значимости, позволяющая использовать восемь частных показателей.
3. Произведённые расчеты показали, что при совместном принятии производственных решений требуется объективная оценка общего состояния. Например, в одинаковых условиях интересы трёх различных представителей процесса существенно отличаются от консолидированного решения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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

2. Михайлин Д.А. Экспертная оценка опасности полета группы воздушных судов при их сближении с помощью программы-диспетчера // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 5. С. 116–130. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-5-116-130
3. Михайлин Д.А. Нейросетевой алгоритм безопасного облета воздушных препятствий и запрещенных наземных зон // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 4. С. 18–24. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-18-24
4. Лебедев Г.Н., Малыгин В.Б. Формирование частных критериев эффективности А-СДМ с учетом интересов участников процесса принятия решений в динамической обстановке // Научный Вестник МГТУ ГА. 2019. Т. 22, № 6. С. 44–54. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-6-44-54
5. Михайлин Д.А., Аллилуева Н.В., Руденко Э.М. Сравнительный анализ эффективности генетических алгоритмов маршрутизации полета с учетом их различной вычислительной трудоемкости и многокритериальности решаемых задач [Электронный ресурс] // Труды МАИ. 2018. № 98. 22 с. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=90386> (дата обращения 23.09.2020).
6. 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.
7. 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
8. Борсоев В.А. Принятие решения в задачах управления воздушным движением. Методы и алгоритмы / В.А. Борсоев, Г.Н. Лебедев, В.Б. Малыгин, Е.Е. Нечаев, А.О. Никулин, Тин Пхон Чжо / Под ред. Е.Е. Нечаева. М.: Радиотехника, 2018. 415 с.
9. 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
10. Никулин А.О., Попов А.А. Внедрение процедур А-СДМ в аэропорту Шереметьево // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 221. С. 68–80.
11. 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
12. Габейдулин Р.Х. Задача динамического регулирования потоков воздушного движения задержками вылетов воздушных судов // Труды ГосНИИ АС. Сер. Вопросы авионики. 2018. № 2. С. 39–53.
13. 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.
14. Соболев Е.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Наука, 1981. 110 с.
15. Игнащенко Е.Ю., Панков А.Р., Семенихин К.В. Минимаксно-статистический подход к повышению надежности обработки измерительной информации // Автоматика и телемеханика. 2010. № 2. С. 76–91.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Лебедев Георгий Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры систем автоматического и интеллектуального управления Московского авиационного института (национальный исследовательский университет), [kaf301@mail.ru](mailto:kaf301@mail.ru).

Малыгин Вячеслав Борисович, начальник тренажерного центра кафедры управления воздушным движением МГТУ ГА, [mbv898@ya.ru](mailto:mbv898@ya.ru).

## CREATING PRIVATE CRITERIA FOR A-CDM EFFECTIVENESS TO TAKE INTO ACCOUNT THE INTERESTS OF DECISION-MAKING PARTICIPANTS 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 the financial support of the Russian Foundation for Basic Research, grant № 19-08-00010

We consider the problem of collaborative decision making of the production process at airlines (CDM) in dynamically changing conditions of occurrence of emergency situations that make changes in the action plan. In the production process, due to the different orientation of the tasks to be solved, the solution may require a large or small number of possible variant solutions. The article presents a concrete example of such a situation affecting the conventional three services of the aviation complex, each with its own interests in the overall production process. The solution to this problem is the only option in favor of the overall production process. For this purpose, several designations and assumptions have been introduced, the list of which can be supplemented. Dynamic priorities are defined for each participant of the process. Optimization of collaborative decision-making can be achieved either by a simple search for solutions, or by using a genetic algorithm that allows you to get a suboptimal solution that meets the requirements of the participants in the process using a smaller number of iterations in real time. In this example, we consider a situation that occurs in a real enterprise due to bad weather conditions. Thus, dynamic priorities are assigned based on a multiplicative form for delayed flights, considering the interests of participants in the process, private criteria are formed for ranking flights at each step of rescheduling, and a genetic algorithm is applied. As a result, we obtained four solutions to the disruption caused by external factors. The first three options correspond to the interests of three parties concerned, and the fourth one is consolidated. All the solutions were different, which indicates the need for an objective and reasonable decision-making apparatus for joint management of the production process. The proposed mathematical apparatus has this ability and prospects for implementation.

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

### REFERENCES

1. 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)
2. Mikhaylin, D.A. (2017). *Flight expert risk assessment of aircraft group at their proximity using a program-manager*. Civil Aviation High Technologies, vol. 20, no. 5, pp. 116–130. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-5-116-130. (in Russian)
3. Mikhaylin, D.A. (2017). *Neural network algorithm safe overflight aerial obstacles and prohibited land areas*. Civil Aviation High Technologies, vol. 20, no. 4, pp. 18–24. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-18-24. (in Russian)
4. Lebedev, G.N. and Malygin, V.B. (2019). *Formation of private performance criteria a-cdm taking into account the interests of the participants in the decision-making process in a dynamic environment*. Civil Aviation High Technologies, vol. 22, no. 6, pp. 44–54. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-6-44-54. (in Russian)
5. Mikhaylin, D.A., Alliluyeva, N.V. and Rudenko, E.M. (2018). *Comparative analysis of the effectiveness of genetic algorithms the routing of the flight, taking into account their different computational complexity and multicriteria tasks*. Trudy MAI, no. 98, 22 p. Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=90386> (accessed 23.09.2020). (in Russian)
6. Zaytsev, A.V. and Talimanchuk, L.L. (2008). *Intellektualnaya sistema prinyatiya resheniy dlya otsenki nauchnoy deyatel'nosti na osnove mnogoagentnoy sistemy* [Intelligent decision-

making system to evaluate scientific activity based on a multi-agent system]. *Neurocomputers*, no. 7, pp. 85–88. (in Russian)

7. **Lugovaya, A.V. and Konovalov, 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)

8. **Borsoyev, V.A., Lebedev, G.N., Malygin, V.B., Nechayev, Ye.Ye., Nikulin, A.O. and Tin Pkhon Chzho.** (2018). *Prinyatiye resheniya v zadachakh upravleniya vozдушnym dvizheniyem. 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)

9. **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)

10. **Nikulin, A.O. and Popov, A.A.** (2015). *Implementation procedures A-CDM at the airport Sheremetyevo*. *Civil Aviation High Technologies*, no. 221, pp. 68–80. (in Russian)

11. **Nechaev, E.E. and Nikulin, A.O.** (2018). *The Analytical treatment of the system «SYN-CHRON» 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)

12. **Gabeydulin, R.Kh.** (2018). *The dynamic air traffic flow management by assigning ground flight delays*. *Trudy GosNII AS. Seriya: Voprosy avioniki*, no. 2, pp. 39–53. (in Russian)

13. **Rudelson, L.E.** (2008). *Programmnoye obespecheniye avtomatizirovannykh system upravleniya vozдушnym dvizheniem. Chast I. Sistemnoye programmnoye obespecheniye. Kniga 2, Operatsyonnyye sistemy realnogo vremeni. Matematicheskiye modeli: uchebnoye posobiye* [Software for automated air traffic control systems. Part I. System software. B2. Real-time operating systems. Mathematical models: Tutorial]. Moscow: MGTU GA, 96 p. (in Russian)

14. **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)

15. **Ignashchenko, E.U., Pankov, A.R. and Semenikhin, K.V.** (2010). *Minimax-statistical approach to increasing reliability of measurement information processing // Avtomatika i Telemekhanika*, no. 2, pp. 76–91. (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 07.08.2020  
Принята в печать 26.11.2020

Received 07.08.2020  
Accepted for publication 26.11.2020