УДК 629.735.015:681.3
DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-6-79-91

ДИНАМИЧЕСКАЯ ДИСЦИПЛИНА ФОРМИРОВАНИЯ ПОТОКОВ ПРИ СОВМЕСТНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОБЩЕСИСТЕМНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Л.Е. РУДЕЛЬСОН[1], С.Н. СМОРОДСКИЙ[2], В.А. ЧЕРНЫШЕВА[1]
[1]Московский государственный технический университет гражданской авиации, г. Москва, Россия
[2]Московский центр автоматизации управления воздушным движением, г. Москва, Россия

Международной организацией гражданской авиации (ИКАО) опубликованы документы, регламентирующие деятельность по увеличению интенсивности полетов. Предлагается на основе технических достижений в области связи, навигации и наблюдения внедрить качественно новые принципы организации воздушного движения. Существующая технология диспетчерского обслуживания основана на принципе регулирования движения воздушных судов с помощью механизма обратной связи. В качестве модели процесса управления выступает план использования воздушного пространства. Отклонения измеряемых параметров движения самолетов от рассчитанных значений могут порождать предпосылки к потенциально конфликтным ситуациям и требуют диспетчерского вмешательства. Инструментом регулирования является новое распределение бортов по месту, времени и высоте. Следуя указаниям диспетчера, пилот либо переходит на обходной маршрут, либо меняет эшелон или скорость. Минимум вмешательств в действия пилота является одним из критериев оценки деятельности диспетчера. Суть предложений ИКАО состоит в переходе от «следящей» системы, реагирующей на отклонения от сбалансированной модели, к системе управления, прогнозирующей тенденции изменения воздушной обстановки в реальном времени. Для воплощения этой возможности необходимо, чтобы в каждом наземном центре и у каждого экипажа имелась непротиворечивая информация о реальной картине событий и ее развитии, чтобы каждое новое намерение (решение) моделировалось, согласовывалось с коллегами и фиксировалось в планах полетов. Для успеха совместного регулирования обстановки необходима компьютерная поддержка в сфере аэронавигационного обеспечения принятия решений, а также быстродействующие алгоритмы оценки текущих параметров процесса обслуживания воздушного движения, таких как текущая пропускная способность аэродромов и секторов, затрагиваемых готовящимися изменениями. В статье обсуждается динамическая модель коллективного формирования и обслуживания потоков с использованием общесистемной информации. Модель построена как многоканальная система с приоритетами. Приведены аналитические оценки пропускной способности. Критериями оценки выбраны показатели вероятности отказа и среднего времени ожидания обслуживания (отказами считаются направление борта на запасной аэродром, уход на второй круг, задержка вылета и т. п.). Предложенные аналитические зависимости подтверждены имитационными компьютерными экспериментами на статистической модели.

Ключевые слова: организация воздушного движения, использование воздушного пространства, формирование потоков самолетов, модели распараллеливания вычислений, дисциплины приоритетного обслуживания.

ВВЕДЕНИЕ

Рост потребностей в авиаперевозках удовлетворяется соразмерным повышением пропускной способности воздушного пространства [1]. Международная организация гражданской авиации (ИКАО) подготовила ряд документов, анализируемых в [2–7], регламентирующих деятельность стран-участниц в этом направлении. Предлагается на базе новых технических достижений в области наблюдения, навигации и связи внедрить качественно новые принципы организации воздушного движения (ОрВД). Существующая технология диспетчерского обслуживания авиарейсов фактически основана на принципе регулирования потоков воздушных судов (ВС) с помощью известного механизма обратной связи. Процесс задается и реализуется в рамках заранее сбалансированного плана использования воздушного пространства (ИВП), который интерпретируется системой как модель воздушной обстановки. В силу различных причин возникают отклонения измеряемых параметров движения самолетов от их рассчитанных значений.

Рассогласования могут порождать нарушения регулярности, рост расходов авиакомпаний, предпосылки к потенциально конфликтным ситуациям и требуют диспетчерского вмешательства, т. е. регулирования потока ВС [1, 2]. Инструментом регулирования являются указания диспетчера. Следуя им, пилот либо переходит на обходной маршрут, либо меняет эшелон или скорость. Если отклонения от расчетов по обновляемой модели ИВП не снижают поддерживаемого уровня безопасности, регулярности, экономичности и подобных, то персонал системы ОрВД корректирует исходную модель, «вписывая» ее параметры в реальную обстановку. Минимум вмешательств в действия пилота является одним из критериев оценки деятельности диспетчера.

Суть предложений экспертов ИКАО по совершенствованию принципов ОрВД состоит в переходе от «следящей» системы, чутко реагирующей на отклонения процесса обслуживания воздушного движения (ОВД) от сбалансированной модели, к системе управления потоками самолетов, прогнозирующей развитие обстановки на всю глубину обслуживаемых полетов и предупреждающей возникновение критических ситуаций, вызываемых корректировкой модели (плана) ИВП. Достигнутый уровень техники позволяет делать это в реальном масштабе времени. Появляется возможность обслуживания полетов, выполняемых по свободным траекториям, что считается [2–5] основой повышения пропускной способности ВП. Для воплощения этой возможности необходимо, чтобы у всей системы, у каждого центра ОрВД и у каждого участника движения (в части, его касающейся) имелась непротиворечивая информация о воздушной обстановке и прогнозе ее развития, чтобы каждое новое намерение (решение) моделировалось, согласовывалось с коллегами и фиксировалось в текущем (тактическом) плане ИВП. Заметим, что термин «следящая система», известный из теории автоматического управления, в приложении к ОВД не является общеупотребительным, так как определяет класс простых регуляторов.

Передовые авиационные державы более полутора десятков лет проводят успешные натурные эксперименты по использованию технологий совместного принятия решений по организации потоков ВС, пока – на существующей сети воздушных трасс. Переход на полеты по свободным траекториям планируется начать к 2025 г. В Европе предпочтительной областью проверки выдвинутых технологических решений являются аэродромные зоны, в США статистика набирается как по аэродромным операциям, так и по полетам (перелетам) на трассах. Эмпирический характер исследований, наряду с положительными результатами, таит в себе и недостатки, например, отсутствие количественной оценки коллективно принимаемых решений; прежде всего по пропускной способности элементов ВП, в которых предполагается регулировать потоки ВС в изменившихся условиях выполнения полетов. Первые шаги для восполнения этого пробела предприняты в [8, 9], где модель воздушного пространства представлена многоканальной системой с приоритетами, каждому каналу которой соответствует район ОрВД. Каналы обслуживают заявки (авиарейсы) автономно и независимо один от другого. Получены средние оценки показателей вероятности отказа и времени ожидания обслуживания.

В данной статье условие независимости работы каналов ослаблено. Рассмотрена динамическая модель (дисциплина) параллельных вычислений.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОТОКОВ

Действующая технология организации потоков воздушного движения основана на процедурах, обеспечивающих удовлетворение требований по безопасности при ограничениях на экономичность и регулярность рейсов [1]. На этапах планирования и обслуживания движения неоднократно (по мере необходимости) пересчитываются пространственно-временные (4D) траектории полетов всех ВС, т. е. производится их перераспределение по месту, времени и высоте. Результаты позволяют определить показатели текущей и планируемой загрузки элементов ВП в любом интервале времени суток, что дает оценку (классификацию) режима деятельности

диспетчера в течение смены как щадящий, напряженный, критический и перегруженный периоды. На основе рассчитанных коэффициентов $k_з$ загрузки (отношение времени занятости к длительности смены) появляется возможность принять превентивные меры для снижения интенсивности полетов в перегруженных секторах, чтобы обеспечить оперативному персоналу нормальные условия работы, при которых значение коэффициента $k_з$ загрузки не достигает критического уровня [8]. Реализация этой возможности достигается в основном двумя методами:

- обновлением планового распределения ВС по месту, времени и высоте (переход на другие эшелоны; задержки рейсов; обходные маршруты; другие маневры рассредоточения);
- обновлением планируемого распределения ВП по месту, времени и высоте (гибкое ИВП; реконфигурация или реструктуризация ВП, т. е. объединение и разъединение секторов).

Во введении отмечено, что диспетчер стремится к неукоснительному выполнению сводного текущего плана (как сбалансированной модели ИВП), что его деятельность фактически реализует принцип обратной связи системы ОВД с управляемой средой [10]. Если воздушная обстановка развивается неблагоприятно и создается угроза безопасности полетов, то ситуация нуждается в восстановлении утраченного рассредоточения управляемых ВС.

На этапах планирования действие принципа обратной связи распространяется, помимо ВС, и на организацию ВП. Заблаговременно принимаются меры по перераспределению потоков при введении и снятии ограничений ИВП для полетов ГА, при прогнозировании опасных явлений погоды (в том числе необходимости градовых стрельб) и т. п. Оптимизация текущего (тактического) и даже суточного плана при изменении условий выполнения полетов и в случаях превышения планируемой интенсивности движения над заявленной пропускной способностью аэродромов и секторов содержит в себе зачатки анализируемых в [2–5] концепций управления системой ОрВД. Они становятся возможными благодаря прогрессу в сфере информатизации и компьютерных наук, в частности в поддержке принятия решений в реальном времени.

Обновление методологии формирования потоков ВС нацеливает оперативный персонал на переход от стремления к педантичному соблюдению сбалансированного плана ИВП к навыку управлять отклонениями от него, т. е. не дожидаться нарушения норм эшелонирования или ввода ограничений полетов по маршруту, но активно использовать доступную информацию о назревающих изменениях. В определенной степени такая позиция практикуется и сейчас [7]. Однако в технологии формирования потоков на основе информации о совместном ИВП [2–5] проявляется еще одно новое качество. К участию в процессе коллективного принятия решений привлекается экипаж, совершающий полет. Пилоту разрешается исполнение отдельных диспетчерских функций (при обязательном согласовании с наземными органами). К числу делегируемых функций относятся самоэшелонирование, маневры по курсу и скорости и т. п.

Для поддержания деятельности по коллективной организации и регулированию потоков становится необходима не только компьютерная поддержка в сфере информационного обеспечения принятия решений, но и наличие быстродействующих алгоритмов оценки текущих и назревающих колебаний параметров воздушной обстановки, таких как действительная пропускная способность элементов ВП, затрагиваемых готовящимися изменениями. Ниже обсуждается динамическая модель параллельных вычислений для коллективного обслуживания и формирования потоков ВС с использованием общесистемной информации.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной статье термин «параллельные вычисления» обозначает не столько совместное решение расчетных задач на многих компьютерах, сколько поддержание достоверности, непротиворечивости и достаточной полноты информации о воздушной обстановке в каждом назем-

ном центре системы ОрВД и на борту каждого управляемого объекта, т. е. ВС, совершающего полет. Очевидно, что для успешной организации процесса каждый участник совместного принятия решений может корректировать общедоступные файлы и что изменения автоматически рассылаются по компьютерам всех участников. Параллелизм обмена данными по замыслу охвата абонентов схож с защищенными фрагментами сети Интернет, но отличается жесткими требованиями работы в реальном времени в рамках задач специализированной системы ОВД.

Известны [11] две схемы распараллеливания заявок, поступающих в многоканальную систему массового обслуживания (СМО): статическая и динамическая. Объединение вычислительных ресурсов (каналов СМО) ЕС ОрВД диктуется условием совместной работы с общедоступной аэронавигационной информацией, обсуждаемым в [2–5]. Статическое распараллеливание представляет собой дисциплину, согласно которой за каждым каналом (или группой каналов) жестко закрепляются заявки одного потока (или ограниченной группы потоков), а заявки других потоков объявляются запрещенными. Например, задачи каждого района ОВД решаются в его центре. Вводы диспетчера обрабатываются на его персональном компьютере, а вводы коллег – на их компьютерах. Когда «закрепленные» заявки не поступают, канал (или группа каналов) может простаивать (даже при перегрузке других каналов полной системы). Оценка пропускной способности системы, использующей статическую дисциплину, проведена в [8].

Динамическая дисциплина (наглядный пример – «облачные» вычисления) допускает заявки любого типа на любой свободный канал СМО, подчиняясь при выборе не жесткому «закреплению», а лишь шкале приоритетности. Основные закономерности дисциплины проследим на схеме двухприоритетной двухканальной СМО ($n = m = 2$), где n – число каналов обслуживания, m – число входящих потоков. Затем распространим результат на произвольные значения n и m (рис. 1). Оба потока простейшие (пуассоновское распределение), интенсивности поступления заявок λ_1 и λ_2 соответственно. Обслуживание экспоненциальное, его параметры μ_1 и μ_2; загрузка ρ_i каждым i-м потоком $\rho_i = \lambda_i/\mu_i$; коэффициент υ вариации (отношение среднеквадратического отклонения длительности обслуживания к ее математическому ожиданию) равен единице. Заявки принимаются в общий буферный накопитель (БН) объемом r мест, где ожидают обработки (по принципу приоритетного вытеснения) и обслуживаются с относительными приоритетами. Суммарная загрузка ρ_Σ системы обоими потоками меньше единицы $\rho_\Sigma = \rho_1 + \rho_2 < 1$.

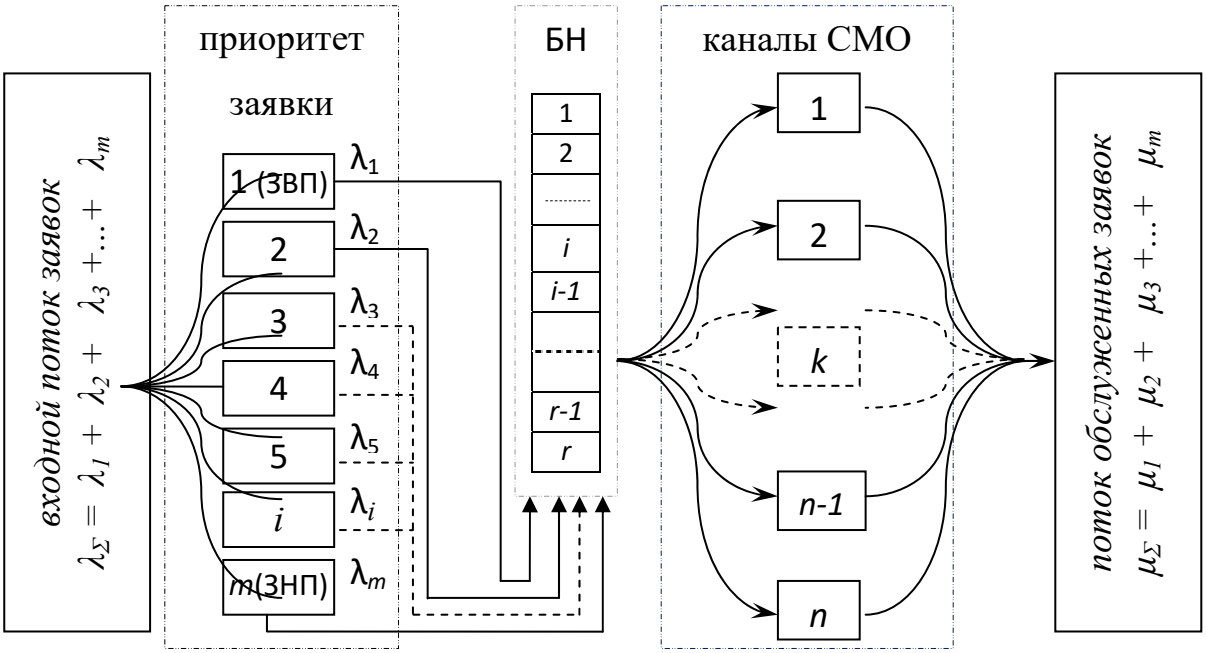

Рис. 1. Многоканальная система массового обслуживания с общим буферным накопителем
Fig. 1. Multi-channel queuing system with a common buffer storage

ОПОРНАЯ МОДЕЛЬ ПОДДЕРЖКИ ДИСПЕТЧЕРСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Термин «обслуживание воздушного движения» при построении аналитической модели фактически предопределяет использование математического аппарата описания многоканальных СМО с приоритетами. В [9, 11] подобная задача рассмотрена для организации вычислительного процесса в компьютерной сети. Основой полученных результатов является известное предположение о том, что в системах с эрланговским распределением времени обслуживания мода длины L очереди заявок может рассчитываться как $L = (1 + \upsilon^2)\rho$, где υ – коэффициент вариации. Справедливость гипотезы доказана аналитически и компьютерными имитационными экспериментами. Применение результатов, полученных при изучении родственных моделей процессов диспетчеризации вычислений и диспетчерского обслуживания полетов, раздвигает границы наших знаний о возможностях известных методик в смежных сферах деятельности.

Рассчитаем вероятности π_1 и π_2 потери соответственно для заявок высокого приоритета (ЗВП) и заявок низкого приоритета (ЗНП) для СМО с двумя поступающими потоками, далее обобщим формулы на произвольные значения n и m. Введем показатель $\gamma = T_2/T_1$, характеризующий соотношение времени занятости системы обслуживанием разных потоков. Согласно замыслу рассматриваемой дисциплины, ЗНП принимается на обработку, когда система освобождается от ЗВП. Низкоприоритетные заявки занимают канал в среднем на время $T_2 = 1/\mu_2$. За этот период в БН накапливается L_1 ЗВП, и, если L_1 не превышает r ($L_1 \le r$), тогда вероятность π_1 потери ЗВП не зависит от характеристик неприоритетного потока и подсчитывается как для $n = 2$, т. е. $\pi_1 = \dfrac{2\rho_1^{r+2}(1-\rho_1)}{1+\rho_1-2\rho_1^{r+3}}$, если $(1 + \vartheta^2)\rho_1\gamma \le r$. При нарушении условия $L_1 \le r$, в сеансе обработки каждой ЗНП БН не может принять очередь L_1 ЗВП, и ее избыток, равный $(L_1 - r)$ заявок, получает отказ, а доля ξ_1 потерь ЗВП составляет

$$\xi_1 = 1 - \frac{r}{(1+\vartheta^2)\rho_1\gamma}, \text{ если } (1 + \vartheta^2)\rho_1\gamma \le r.$$

Вероятность выброса случайной величины, т. е. нарушения неравенства $L_1 \le r$, пропорциональна загрузке ρ_2, поступающей с потоком ЗНП, и вероятности P_2 обслуживания ЗНП при отсутствии мест для формирования очереди L_2 в БН (т. е. свободная зона БН $r_{звп} = 0$):

$$P_2 = \frac{1+\rho_\Sigma - 2\cdot\rho_\Sigma^2}{1+\rho_\Sigma - 2\cdot\rho_\Sigma^3}, \text{ если } (1 + \vartheta^2)\rho_1\gamma > r.$$

Тогда расчетная формула для вероятности π_1 потери ЗВП имеет вид

$$\pi_1 = \frac{2\rho_1^{r+2}(1-\rho_1)}{1+\rho_1-2\rho_1^{r+3}} + \delta\cdot\rho_2\cdot\frac{1+\rho_\Sigma-2\cdot\rho_\Sigma^2}{1+\rho_\Sigma-2\cdot\rho_\Sigma^2}\cdot\left[1-\frac{r}{(1+\vartheta^2)\rho_1\gamma}\right], \text{ где } \delta = \begin{cases} 0, \text{ если } (1+\vartheta^2)\rho_1\gamma \le r, \\ 1 \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

Здесь и далее δ – символ Кронекера. Если слева от точки $\gamma_{кр}$ излома кривых π_1 и π_2 (рис. 2) условие $L_1 \le r$ справедливо, т. е. свободная от ЗВП зона БН насчитывает $r - (1 + \vartheta^2)\rho_1\gamma$ мест, где $\gamma_{кр} = r / (1 + \vartheta^2)\rho_1$, то вероятность π_2 отказа в приеме ЗНП можно рассчитать как

$$\pi_2 = \frac{2\rho_\Sigma^{2+(1-\delta)\left[r-(1+\vartheta^2)\rho_1\gamma\right]}(1-\rho_\Sigma)}{1+\rho_\Sigma-2\cdot\rho_\Sigma^{3+(1-\delta)\left[r-(1+\vartheta^2)\rho_1\gamma\right]}}.$$

Справа от точки $\gamma_{кр}$ излома функции $\pi_2 = f(\gamma)$ абсолютные значения π_2 снижаются в сравнении с вариантом СМО с одним каналом вследствие того, что $\pi_2 = \dfrac{2\rho_\Sigma^2(1-\rho_\Sigma)}{1+\rho_\Sigma - 2\cdot\rho_\Sigma^3} < \dfrac{\rho_\Sigma}{1+\rho_\Sigma}, \quad \rho_\Sigma \neq 0.$

Подробнее данная модель и ее вариации анализируются в [11]. Показано, что коэффициент β эффективности (по критерию π) обслуживания при $\rho \to 1$ и отсутствии БН (т. е. при $r = 0$) использование двух каналов вместо одного приносит выигрыш 20 % (β = 0,2). Для сравнения результатов еще раз обратимся к графику функции $\pi_i = f(\gamma)$ в области (рис. 2) слева от точки $\gamma_{кр}$. Набрана статистика по СМО с характеристиками: количество каналов n = {1,2}; объем БН r = 10; загрузка $\rho_1 = \rho_2$ = 0,45; ϑ = 0. Сопоставлены данные расчетов и компьютерной имитации. Для разных n представлены экспериментальные и теоретические кривые. При переходе от n = 1 к n = 2 наблюдается определенный рост π_1 и снижение π_2. Нетрудно объяснить эту тенденцию. В интервале (0, $\gamma_{кр}$) по оси абсцисс вероятности π_1 и π_2 уменьшаются, потому что в СМО с n = 2 на единицу больше мест для ожидания (за счет занятости еще одного канала). Для π_2 этот факт весомее, потому что остаток общего БН, предоставляемый ЗНП, увеличивается, а ЗВП по-прежнему используют весь его объем r. В полуинтервале ($\gamma_{кр}$, ∞] π_2 становится меньше, так как в силу приоритетного вытеснения ЗНП для последних перестают существовать места в БН. При этом значение π_2 снижается относительно системы с одним каналом на 20 % (β = 0,2), и π_1 повышается вследствие увеличения занятости СМО неприоритетными заявками справа от $\gamma_{кр}$.

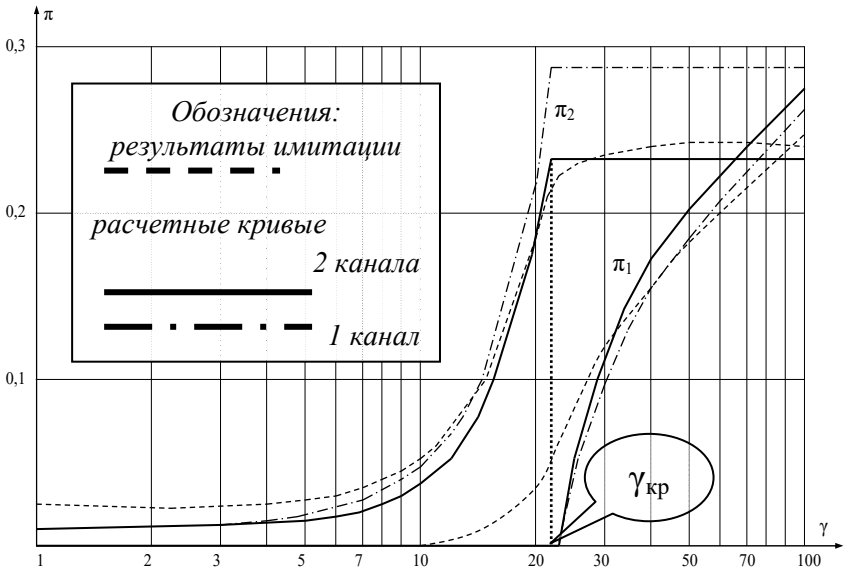

Рис. 2. Графики зависимостей $\pi_i = f(\gamma)$
Fig. 2. Graphs of the dependences $\pi_i = f(\gamma)$

Максимум погрешности расчетных формул (в сравнении с имитацией) наблюдается в окрестности точки $\gamma_{кр}$. Функции $\pi_i = f(\gamma)$ являются релейными, и согласно логике построения гипотезы, в точке $\gamma_{кр}$ целочисленным скачком меняется величина зоны общего БН, освобождаемой от ЗВП. Компьютерная имитация вычисляет результат по сумме состоявшихся стохастических (псевдослучайных) событий поступления заявок, и этот скачок сглаживается.

Подтверждается [8], что применение многоканальных СМО снижает эффективность диспетчеризации, так как выравниваются значения вероятностей отказа для заявок потоков высоких и низких приоритетов. Рисунок 2 показывает конкретную точку на оси абсцисс $\gamma_{кр}$ ≈ 65, вычисленную в эксперименте, правее которой величина π_1 превышает π_2. Точка $\gamma_{кр}$, в которой пересекаются функции вероятностей потери заявок, рассчитанная по формулам, расположена в области более высоких γ ($\gamma_{кр}$ ≈ 85), чем полученная в имитационном эксперименте, сглаживающем скачок релейной функции. Уточним также, что трудно подобрать пример реальной системы с такими завышенными показателями γ. Однако следует помнить о рассмотренном свойстве многоканальных систем, иначе оно может проявить себя в самое неподходящее время.

Обобщим результаты: пусть в систему поступают m простейших потоков, обслуживаемых n каналами по динамической схеме разделения. Рассмотрим три возможные разновидности

(типа) процесса. Различаются типы функционирования как соотношением объема r буфера, так и величинами длины L_k, L_{k-1} размещенных очередей. Первый из них соответствует условию

$$L_k = (1+\vartheta^2)\cdot\sum_{i=1}^{k} T_i\lambda_i = (1+\vartheta^2)\cdot\gamma_i\cdot\sum_{i=1}^{k}\left(\frac{\rho_i}{\gamma_i}\right) \le r, \quad i=\overline{1,k},$$

утверждающему, что, если за период $T_j(k \le j \le m)$ значение L_k длины очереди ЗВП, включая k-ю, меньше размера r БН, тогда k-й поток обслуживается в «щадящем» режиме. Такая разновидность помечается в формуле верхним индексом (I) при π, и для нее справедливо

$$\pi_k^{(I)} = \frac{\dfrac{n^{n-1}}{(n-1)!}\left(\sum_{i=1}^{k}\rho_i\right)^{r+n-(1+\vartheta^2)\gamma_m\cdot\sum_{i=1}^{k-1}\left(\frac{\rho_i}{\gamma_i}\right)}\cdot\left(1-\sum_{i=1}^{k}\rho_i\right)}{\sum_{h=0}^{n}\dfrac{n^{h-1}(n-h)}{h!}\left(\sum_{i=1}^{k}\rho_i\right)^{h} - \dfrac{n^{n-1}}{(n-1)!}\left(\sum_{i=1}^{k}\rho_i\right)^{r+n-(1+\vartheta^2)\gamma_m\cdot\sum_{i=1}^{k-1}\left(\frac{\rho_i}{\gamma_i}\right)+1}}.$$

Иными словами, выстраивающаяся в течение T_j очередь ЗВП не вытесняет заявки k-го потока, и вероятность π_k потери заявки k-го типа зависит от загрузки, создаваемой k потоками (с номерами $k - i + 1$) и частью БН, свободной от ЗВП. Для потоков с индексами $j = k+1, \ldots, m$, расставленных по приоритетам не выше k-го, ситуация утрачивает состояние равновесия, и система переходит либо в «критический» режим, либо в режим перегрузки.

Второй тип функционирования отображает «критический» режим, при котором очередь L_{k-1} еще помещается в БН, а L_k уже превышает его объем. Разновидность описывается условием

$$(1+\vartheta^2)\gamma_m\sum_{i=1}^{k}\left(\frac{\rho_i}{\gamma_i}\right) > r \ge (1+\vartheta^2)\gamma_m\sum_{i=1}^{k-1}\left(\frac{\rho_i}{\gamma_i}\right),$$

утверждающим, что за время T_j обработки заявки j-го потока ($j > k$), более длительное, чем для k-го потока, величина L_k длины накапливаемой очереди ЗВП, включая k-ю, превосходит размер r буфера. Следовательно, очередь L_{k-1} высокоприоритетных заявок ($i < k$) можно разместить в общем БН. Тогда k-е заявки будут частично приняты в СМО, но остальные не найдут свободных мест и будут потеряны, а доля ξ_{km} потерь рассчитается [11] как

$$\xi_{km} = 1 - \frac{\gamma_k\left[r-(1+\vartheta^2)\gamma_m\sum_{i=1}^{k-1}\left(\frac{\rho_i}{\gamma_i}\right)\right]}{(1+\vartheta^2)\,\rho_k\,\gamma_m}.$$

Вероятность P_j обслуживания заявок j-го потока, $j=\overline{k+1,m}$, в условиях рассмотренного их вытеснения во время ожидания более приоритетными заявками, составляет

$$P_j = \frac{\sum_{h=0}^{n} \frac{n^{h-1}(n-h)}{h!}\left(\sum_{i=1}^{j}\rho_i\right)^h - \frac{n^{n-1}}{(n-1)!}\left(\sum_{i=1}^{j}\rho_i\right)^{r+n-(1+\vartheta^2)\gamma_m \sum_{i=1}^{j-1}\left(\frac{\rho_i}{\gamma_i}\right)}}{\sum_{h=0}^{n} \frac{n^{h-1}(n-h)}{h!}\left(\sum_{i=1}^{j}\rho_i\right)^h - \frac{n^{n-1}}{(n-1)!}\left(\sum_{i=1}^{j}\rho_i\right)^{r+n-(1+\vartheta^2)\gamma_m \sum_{i=1}^{j-1}\left(\frac{\rho_i}{\gamma_i}\right)+1}}.$$

При ограничениях, введенных в ходе анализа второй разновидности процесса, вероятность π_k потери заявки (верхний индекс *II*) оценивается выражением

$$\pi_k^{(II)} = \pi_k^{(I)} + \sum_{j=k+1}^{m} \delta_{jk}\, \rho_j\, P_j\, \xi_{kj}, \quad \text{где} \quad \delta_{jk} = \begin{cases} 0, \text{ если } L_k \le r, \text{ т. е. } (1+\theta^2)\gamma_m \sum_{i=1}^{k}\left(\frac{\rho_i}{\gamma_i}\right), \\ 1 \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

Третья возможная разновидность протекания процесса (верхний индекс *III*) описывается неравенством $(1+\vartheta^2)\gamma_j \sum_{i=1}^{k-1}\left(\frac{\rho_i}{\gamma_i}\right) > r$. Оно означает, что при обслуживании одной заявки *j*-го типа ($j = \overline{k+1, m}$) в СМО формируется очередь ЗВП, имеющих индексы $i = \overline{1, k-1}$, заполняющая все *r* мест обобществленного БН. При этом ранее поступившие заявки *k*-го потока удаляются, а приходящие следом получают отказ и в очередь ожидания не включаются. Для этой разновидности, названной выше «режимом перегрузки», вероятность $\pi_k = 1 - P_k$ определяется загрузкой, доставляемой *k* первыми потоками в условиях отсутствия БН для ЗНП (т. е. при $r = 0$):

$$\pi_k^{(III)} = \frac{\frac{n^{n-1}}{(n-1)!}\left(\sum_{i=1}^{j}\rho_i\right)^{n-(1+\vartheta^2)\gamma_m \sum_{i=1}^{j-1}\left(\frac{\rho_i}{\gamma_i}\right)} \cdot \left(1 - \sum_{i=1}^{j}\rho_i\right)}{\sum_{h=0}^{n} \frac{n^{h-1}(n-h)}{h!}\left(\sum_{i=1}^{j}\rho_i\right)^h - \frac{n^{n-1}}{(n-1)!}\left(\sum_{i=1}^{j}\rho_i\right)^{n-(1+\vartheta^2)\gamma_m \sum_{i=1}^{j-1}\left(\frac{\rho_i}{\gamma_i}\right)+1}}.$$

Для расчета объема *r* БН, как правило, используют продиктованные замыслом системы значения загрузки ρ каждым потоком, соотношения γ средних времен обслуживания заявок, а также желательные величины π. Предпочтительно выводить систему в «щадящий» режим, описываемый первой частью составной формулы (π^I), поддерживающий стабильное взаимодействие потоков. Такой результат достигается с помощью варьирования показателей γ и места *k* в приоритетной шкале. Следует убедиться, что вычисленное значение *r* не нарушает ограничений по «времени жизни» (ожидания обработки) заявок. Иначе придется ослабить требования к показателю π, чтобы эпизодические переполнения БН не приводили к потерям ξ_{km} заявок.

Для удобства анализа на рис. 3 совмещены графики $\pi_i = f(\gamma)$, построенные по результатам расчетов и компьютерных имитационных экспериментов. Статическая (жесткая) дисциплина представлена моделью с приемом заявок в раздельные секции БН, динамическая (плавающая) – с формированием общей очереди ожидания обслуживания. Эффективность по критерию π в статической модели не зависит от аргумента γ, а в динамической растет с его увеличением. При $\gamma_{кр} = r/(1+\vartheta^2)\rho_1$ ситуация выравнивается, а правее точки $\gamma_{кр}$ динамическая дисциплина становится менее предпочтительной. Слева от $\gamma_{кр}$ потери при динамической дисциплине будут ниже.

Предложенный аппарат, проверенный экспериментально, позволяет рассчитать рациональные длины очередей заявок в единицу времени, т. е. пропускную способность многоканальной СМО как с динамической, так и статической схемой разделения задач.

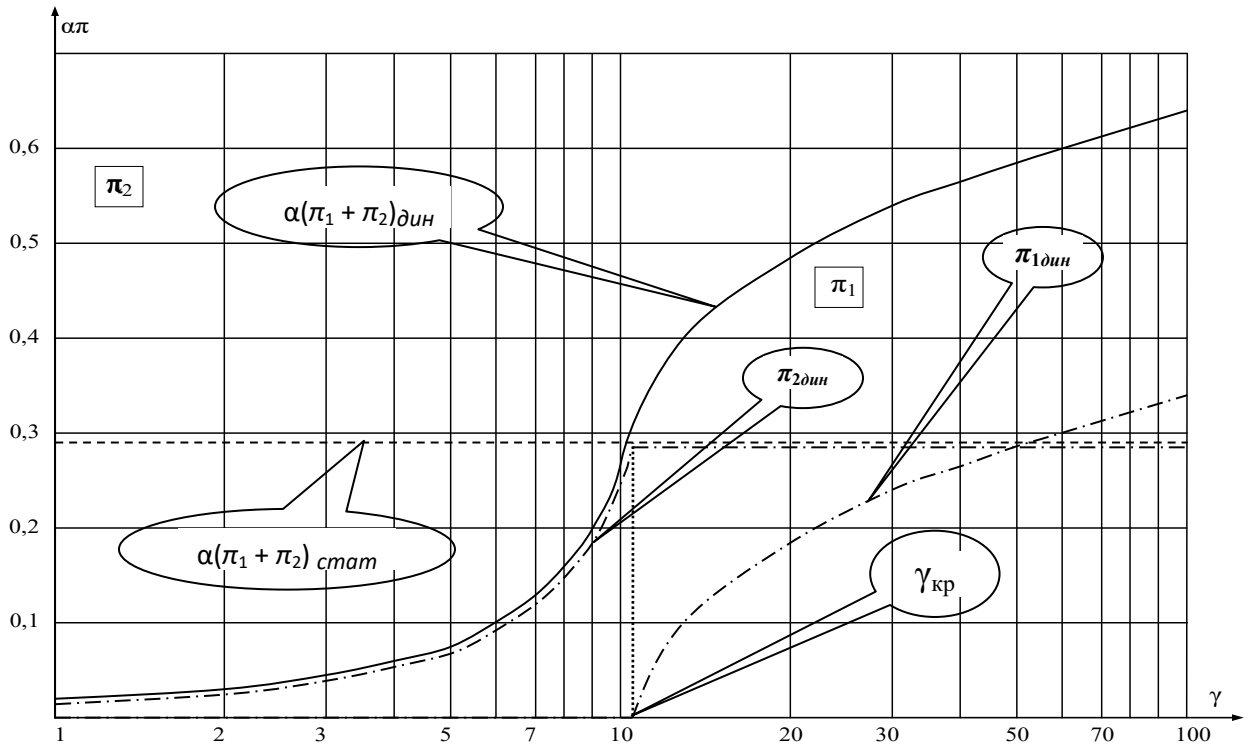

Рис. 3. Графики зависимостей π = *f*(γ) для статической и динамической дисциплин
Fig. 3. Graphs of the dependences π = *f* (γ) for the static and dynamic disciplines

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВРЕМЕНИ ОЖИДАНИЯ И ОБСЛУЖИВАНИЯ

Предварительные выражения получены при обсуждении опорной модели динамического распараллеливания. Мода величины T времени ожидания при анализе процесса образования очереди L_{k-1} более приоритетных заявок, чем k-е, рассчитана исходя из соотношения

$$\mathrm{L}_{k-1} = \sum_{i=1}^{k-1} \mathrm{Q}_i \text{, где } \mathrm{Q}_\mathrm{i} = \begin{cases} (1+\vartheta^2)\gamma_k \left(\dfrac{\rho_i}{\gamma_i}\right), \text{ если } \mathrm{Q}_\mathrm{i} \le r - \left(\sum_{i=1}^{k-1} \mathrm{Q}_i\right), \\ r \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

Время T_{Qi} обслуживания Q_i заявок вычисляется как $T_{Qi} = (1+\vartheta^2)\ Q_i T_i$, где T_i – среднее значение времени обслуживания заявки i-го типа, т. е. для моды L_{k-1} последовательности ЗВП справедливо $T_L = \sum_{i=1}^{k-1} T_{Qi} = (1+\vartheta^2)\gamma_k \sum_{i=1}^{k-1} \left(T_i\, \rho_i / \gamma_i\right)$. За это время в СМО накапливается приращение $\Delta L'$ очереди ЗВП с индексами $i < k$. Согласно допущению о стационарности и условию $\sum_{i=1}^{m} \rho_i < 1$, интенсивности λ_i поступления заявок меньше параметров μ_i их обслуживания, и оче-

редь L_{k-1} с учетом поступления ее приращений $\Delta L'$, $\Delta L''$, …, ΔL^{l_i} неизбежно укорачивается: $\Delta L' = (1+\vartheta^2)\gamma_k \sum_{i=1}^{k-1}\left(\frac{\rho_i}{\gamma_i}\right)^2$, $\Delta L'' = (1+\vartheta^2)\gamma_k \sum_{i=1}^{k-1}\left(\frac{\rho_i}{\gamma_i}\right)^3$ …

Расчет L_{k-1} предусматривает l_i убывающих приращений ΔL ЗВП i-х приоритетов, более высоких, чем k-й, ($i < k$). Процедура вычисления L_{k-1} заканчивается на l_i-м шаге, когда получаем приращение ΔL, не достигающее единицы. Тогда считаем, что СМО освободилась от заявок потоков с индексами $i < k$ и может приступить к обслуживанию заявок k-го типа. В силу того, что поступление заявок разных типов пропорционально интенсивностям соответствующих входных потоков, для соблюдения условия $Q_i \le r_i$ достаточно потребовать $(1+\vartheta^2)\gamma_k(\rho_i/\gamma_i)^{l_i} \le \lambda_i \Big/ \sum_{j=1}^{k-1}\lambda_j$,

откуда $\Delta L^{l_i} = (1+\vartheta^2)\gamma_k \sum_{i=1}^{k-1}\left(\frac{\rho_i}{\gamma_i}\right)^{l_i} \le 1$, а $l_i = \left\lceil \ln\lambda_i - \ln\sum_{j=1}^{k-1}\lambda_j \Big/ \ln\left[(1+\vartheta^2)\gamma_k \frac{\rho_i}{\gamma_i}\right]\right\rceil$, где символ $\lceil * \rceil$ (антье) означает ближайшее большее целое (в меньшую сторону). Уточним, что вычисленные значения приращений длины l_i укорачивающейся суммарной очереди заявок высоких приоритетов содержат дробную часть, что противоречит физическому смыслу (как и отрицательное количество заявок). Либо заявка поступает в систему, либо получает отказ и теряется. По этой причине дробная часть отбрасывается, а оставшееся целое дополнительно проверяется на отрицательное значение $l_i = \max\left\{0, \left\lceil \ln\lambda_i - \ln\sum_{j=1}^{k-1}\lambda_j \Big/ \ln\left[(1+\vartheta^2)\gamma_k \frac{\rho_i}{\gamma_i}\right]\right\rceil\right\}$.

Тогда длина L очереди всех ЗВП с индексами $i < k$, формирующейся в системе за время обслуживания одной заявки j-то типа, $j = \overline{k,m}$, с учетом l_i всех приращений ее длины, накопленных при освобождении от L_{k-1} ЗВП, составит $L = (1+\vartheta^2)\gamma_k \sum_{i=1}^{k-1}\left[1-\left(\frac{\rho_i}{\gamma_i}\right)^{l_i+1}\right] \Big/ \left(1-\frac{\rho_i}{\gamma_i}\right)$, а период T занятости ее обслуживанием $T = (1+\vartheta^2)\gamma_k \sum_{i=1}^{k-1} T_i \left[1-\left(\frac{\rho_i}{\gamma_i}\right)^{l_i+1}\right] \Big/ \left(1-\frac{\rho_i}{\gamma_i}\right)$.

Расчетные значения нетрудно сопоставить с директивными сроками («временем жизни»), в течение которых заявки по замыслу разработчика должны быть обслужены. Если результаты расчетов не соответствуют заданным срокам, необходимо изменить параметры СМО λ_i, μ_i, r и γ таким образом, чтобы выполнялись требования заказчика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом статьи является вывод о снижении эффективности приоритетного обслуживания заявок на ИВП при переходе от одноканальной СМО к многоканальной. В сочетании с оценками пропускной способности элементов ВП, полученными в [8], важен и предпринятый сравнительный анализ характеристик статической и динамической дисциплин организации параллельных вычислений. Результат позволяет найти области изменения параметров системы, в которых применение той или иной дисциплины становится предпочтительным (рис. 3). В целях гармонизации ЕС ОрВД с направлением развития организационных и технических средств в мировом авиационном сообществе, желательно прилагать собственные усилия к достижению целей, выдвинутых на передний план документами ИКАО, анализируемыми в [2–5], где разработаны технологические аспекты повышения пропускной способности ВП. Иначе возрастает риск оказаться в ситуации конца прошлого века. Тогда отставание уровня отечествен-

ной системы побуждало иностранные авиакомпании планировать рейсы из Европы на Дальний Восток и обратно не через Россию, а кружным путем, вдоль южного побережья Азии, оснащенного импортным оборудованием обеспечения требований безопасности. Владельцы ВС несли потери в доходности полетов вследствие удлинения пути между аэродромами вылета и назначения в полтора раза и более, а РФ лишалась сборов за аэронавигационное обслуживание.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бестугин А.Р.** Автоматизированные системы управления воздушным движением / А.П. Плясовских, А.Д. Филин, А.Ю. Шатраков. Челябинск: Фонд развития Аэронавигации им. Г.Н. Пирогова, 2016. 367 с.

2. **Дегтярев О.В., Зубкова И.Ф.** Программы развития систем организации воздушного движения Европы и США (SESAR и NextGen). М.: ГосНИИ АС, 2011. 256 с.

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

4. **Евдокимов К.П.** Основные этапы развития Единой системы организации воздушного движения в Российской Федерации // Военный научно-практический вестник МО РФ. 2015. № 1(2). С. 29–32.

5. **Князевский Д.А.** Организация и обслуживание воздушного движения: учебное пособие. Ульяновск: УВАУ ГА(И), 2011. 201 с.

6. **Дегтярев О.В., Зубкова И.Ф.** Методы и особенности математического моделирования систем организации воздушного движения // Известия РАН. Теория и системы управления. 2012. № 4. С. 62–76.

7. **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, Пхон Чжо Тин. М.: Радиотехника, 2018. 432 с.

8. **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.

9. **Перебейнос С.В., Черникова М.А.** Динамическая дисциплина приоритетного обслуживания на компьютерной сети // Научный Вестник МГТУ ГА. 2008. № 132. С. 65–72.

10. Планирование и организация потоков воздушного движения: учебное пособие / Сост. В.А. Казаков. Ульяновск: УВАУ ГА, 2008. 89 с.

11. **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.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Рудельсон Лев Ефимович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры управления воздушным движением Московского государственного технического университета гражданской авиации, l-rudelson44@yandex.ru.

Смородский Станислав Николаевич, инженер по навигации, радиолокации и связи Московского центра автоматизации управления воздушным движением, stas_avas@mail.ru.

Чернышева Виктория Александровна, старший преподаватель кафедры управления воздушным движением Московского государственного технического университета гражданской авиации, dc-10-40f@mail.ru.

DYNAMIC DISCIPLINE OF PARALLEL SERVICE IN CONCEPT

FLIGHT AND FLOW – INFORMATION FOR A COLLABORATIVE ENVIRONMENT

Lev E. Rudel'son[1], Stanislaw N. Smorodskiy[2], Victoriya A. Chernyshyova[1]
[1]*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*
[2]*Moscow Center of Air Traffic Management Automation, Moscow, Russia*

ABSTRACT

The International Civil Aviation Organization (ICAO) has published documents regulating the measures aimed to increase the intensity of flights. It is supposed to introduce qualitatively new principles of air traffic management based on the technical achievements in the field of communication, navigation and surveillance. The existing dispatching service technology is based on the principle of regulating the flow of aircraft through the feedback mechanism. The plan of the airspace utilization is used as the model for the management process. Deviations in the measurand of the aircraft movement from the calculated values can create prerequisites for potentially conflict situations and require the intervention of air traffic controller. The adjustment tool is a new distribution of the aircraft in their place, time and height. Following the instructions of the dispatcher, the pilot either proceeds to the bypass route, or changes either the altitude or speed. Minimal interference in the actions of the pilot is one of the criteria for assessing the controller's work. The essence of ICAO's proposals is in the transition from the "tracking" system which responds to the deviations from the balanced model to the control system which predicts the tendencies to changing the air situation in real time. In order to realize this intention, every ground center and every crew should have consistent information about the real situation in the air and its development, so that each new intention (decision) is modeled, agreed on by the colleagues and fixed in flight plans. To reach the success in co-regulation of the situation it is important to have computer support in the field of aeronautical maintenance of decision-making, as well as high-speed algorithms for assessing the current parameters of the air traffic servicing process, such as handling capacity of aerodromes and terminals related to the changes being prepared. The article discusses the dynamic model of collective formation and flow maintenance using system-wide information. The model is built as a multi-channel system with priorities. Analytical estimates of the throughput are given. Criteria for the assessment are the indicators of the probability of failure and the average waiting time for maintenance by controller (refuses include the direction of the aircraft to the alternate aerodrome, repeated circle of landing, delayed departure, etc.). The proposed formulae are confirmed by the results of simulation computer experiments and statistical modeling.

Key words: air traffic management, use of airspace, formation of aircraft flows, models of parallel computing, disciplines of service with priorities.

REFERENCES

1. Bestugin, A.R., Plyasovskikh, A.P., Filin, A.D. and Shatrakov, A.Yu. (2016). *Avtomatizirovannye sistemy upravleniya vozdushnym dvizheniyem* [Automated air traffic management systems]. Chelyabinsk: The Fund for the Development of Air Navigation, 367 p. (in Russian)

2. Degtyarev, O.V. and Zubkova, I.F. (2011). *Programmy razvitiya sistem organizatsii vozdushnogo dvizheniya Evropy i SSHA (SESAR i NextGen)* [Programs for the development of air traffic management systems in Europe and the US (SESAR and NextGen)]. Moscow: GosNII AS, 2011, 256 p. (in Russian)

3. Gabeydulin, R.Kh. (2018). *Zadacha dinamicheskogo regulirovaniya potokov vozdushnogo dvizheniya zaderzhkami vyletov vozdushnikh sudov* [The task of dynamically regulating the flow of air traffic by delays in departures of aircraft]. *Trudy GOSNII AS. Ser. Voprosy avioniki* [Proceedings of GosNII AS. Ser. Avionics questions], no. 2, pp. 39–53. (in Russian)

4. Evdokimov, K.P. (2015). *Osnovnye etapy razvitiya Edinoy sistemy organizatsii vozdushnogo dvizheniya v Rossiyskoy Federatsii* [The main stages of the development of the Unified Air Traffic Management System in the Russian Federation]. *Voennyy nauchno-prakticheskiy vestnik MO RF* [Military Scientific and Practical Bulletin of the Ministry of Defense of the Russian Federation], no. 1(2), pp. 29–32. (in Russian)

5. Knyazevskiy, D.A. (2011). *Organizatsiya i obsluzhivaniye vozdushnogo dvizheniya* [Organization and maintenance of air traffic]. *Uchebnoye posobiye* [Tutorial]. Ulyanovsk: UVAU GA(I), 201 p. (in Russian)

6. Degtyarev, O.V. and Zubkova, I.F. (2012). *Metody i osobennosti matematicheskogo modelirovaniya sistem organizatsii vozdushnogo dvizheniya* [Methods and features of mathematical modeling of air traffic management systems]. Journal of Computer and Systems Sciences International. *Ser. Teoriya i sistemy upravleniya* [Ser. Theory and Control Systems], no. 4, pp. 62–76. (in Russian)

7. Borsoev, V.A., Lebedev, G.N., Malygin, V.B., Nechayev, Ye.Ye., Nikulin, A.O. and Tin, Pkhon Chzho. (2018). *Prinyatiye resheniya v zadachakh upravleniya vozdushnym dvizheniyem. Metody i algoritmy* [Decision Making in Air Traffic Management Tasks. Methods and Algorithms]. Moscow: Radio Engineering, 432 p. (in Russian)

8. Zhiltsov, I.E., Mitrofanov, A.K. and Rudelson, L.E. (2018). *Otsenka propusknoy sposobnosti v zadache sovmestnogo planirovaniya potokov vozdushnikh sudov* [Estimating Throughput in the Collaborative Planning of Aircraft Flows]. Civil Aviation High Technologies, vol. 21, no. 2. (in Russian)

9. Perebeynos, S.V. and Chernikova, M.A. (2008). *Dinamicheskaya disstiplina prioritetnogo obsluzhivaniya na komputernoy seti* [Dynamic arrangement of Priority Processing on the Computing Network]. The Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 132. (in Russian)

10. Kazakov, V.A. (2005). *Metodika opredeleniya propusknoy sposobnosti dispetcherskikh punktov* [Method for determining the throughput of control points]. Tutorial. Ulyanovsk. (in Russian)

11. Rudelson, L.E. (2007). *Programmnoe obespechenie avtomatizirovannykh system upravleniya vozdushnym dvizheniem. Ch. I. Sistemnoe programmnoe obespechenie. Kn. 2. Operatsionnye sistemy realnogo vremeni* [Software for Automated Air Traffic Management Systems. Part I. System Software. Book 2. Real-time operating systems]. Tutorial. Moscow: MSTUCA. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lev E. Rudelson, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Air Traffic Management Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, l-rudelson44@yandex.ru.

Stanislaw N. Smorodskiy, Radio Navigation, Radars and Communication Engineer, Moscow Center of Air Traffic Management Automation , stas_avas@mail.ru.

Victoriya A. Chernyshyova, Senior Lecturer, Air Traffic Management Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, dc-10-40@mail.ru.

Поступила в редакцию	16.03.2018	Received	16.03.2018
Принята в печать	20.11.2018	Accepted for publication	20.11.2018