УДК: 629.735.015:681.3
DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-2-83-95

ОЦЕНКА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ В ЗАДАЧЕ СОВМЕСТНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ПОТОКОВ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

И.Е. ЖИЛЬЦОВ[1], А.К. МИТРОФАНОВ[2], Л.Е. РУДЕЛЬСОН[1]
[1]*Московский государственный технический университет гражданской авиации, г. Москва, Россия*
[2]*Московский центр автоматизации управления воздушным движением, г. Москва, Россия*

Авиатранспортные системы традиционно находятся на передовых рубежах науки и техники. Инженерные достижения внедряются при проектировании и эксплуатации воздушных судов, обустройстве аэродромов и воздушных трасс, совершенствовании радиотехники. Для повышения экономической эффективности поставщики воздушных перевозок повышают пропускную способность воздушного пространства. Эксперты Международной организации гражданской авиации (ИКАО) планируют к 2025 г. утроить достигнутые количественные показатели как на основе растущего научно-технического потенциала, так и с помощью улучшения организации воздушного движения. Технически такой скачок подготовлен развитием спутниковой навигации, но требует обновления правил производства полетов. Этот пробел восполнен в руководящих документах ИКАО, где разработана технология, гарантирующая нужные показатели пропускной способности на основе оперативного взаимодействия специалистов в масштабе всего объема пространства (совокупности так называемых «горизонтов планирования»). В настоящее время отсутствует аналитический аппарат для оптимального выбора рациональной реализации новых технологий, известны лишь универсальные средства (например, комплексы имитационного моделирования авиационных систем). В данной статье обсуждаются родственные модели процессов управления полетами и получены оценки пропускной способности с учетом приоритетности выполняемых рейсов. Каждому рейсу ставится в соответствие государственный приоритет его обслуживания, который может изменяться в зависимости от развития воздушной обстановки (бедствие на борту, опасные атмосферные явления, отказы техники и т. д.). Задача оценки пропускной способности взаимодействующих горизонтов планирования анализируется на модели многоканальной системы с приоритетами. Каждый горизонт планирования является каналом обслуживания, выполняющим функции организации потоков движения, реструктуризации пространства и процесса управления на своей территории, а также поддержания целостности информации во взаимодействующих горизонтах. Критериями оценки предлагаются хорошо зарекомендовавшие себя на практике показатели среднего времени ожидания обслуживания и вероятности отказа, под которым понимаются такие события, как направление борта на запасной аэродром, уход на второй круг, задержка вылета и другие существенные отклонения от сбалансированного суточного плана использования воздушного пространства.

Ключевые слова: организация воздушного движения, использование воздушного пространства, модели горизонтов планирования, дисциплины обслуживания с приоритетами, формирование потоков самолетов.

ВВЕДЕНИЕ

Инвестиционная привлекательность авиатранспорта обеспечивает отрасли приток капитальных вложений и продвигает ее на передовые рубежи науки и техники. Инженерные достижения внедряются при проектировании и эксплуатации воздушных судов (ВС), обустройстве аэродромов и воздушных трасс, совершенствовании радиотехники. Для достижения максимальной экономической эффективности поставщики воздушных перевозок повышают пропускную способность воздушного пространства (ВП). Эксперты Международной организации гражданской авиации (ИКАО, *англ. International Civil Aviation Organization – ICAO*) планируют к 2025 г. утроить достигнутые количественные показатели как на основе научно-технического потенциала, так и с помощью улучшения организации воздушного движения (ОрВД).

Термин ОрВД [1] определяет комплекс мероприятий по оперативной оптимизации структуры ВП, а также процессов формирования и обслуживания потоков самолетов. Поначалу развитие ОрВД шло экстенсивно: для повышения пропускной способности системы объемы ВП

секторов управления воздушным движением (УВД) делили на части, отчего нагрузка на каждого диспетчера снижалась и освобождалось его время для принятия взвешенных решений. Этот путь исчерпал себя в конце 50-х годов, но именно тогда в обиход вошли средства вычислительной техники и начался бум автоматизации УВД. Все рутинные операции перекладывались на компьютеры, и до 90-х годов XX века заявленная пропускная способность ВП удовлетворяла спрос на авиаперевозки пассажиров и грузов. Однако на рубеже тысячелетий возросшие потребности в услугах гражданской авиации (ГА) вновь привели к необходимости увеличения пропускной способности ВП. Технически они были подготовлены развитием спутниковой навигации, однако не подкреплялись обновлением правил ОрВД. Этот пробел восполнен экспертами ИКАО в руководящих документах [2–5], где разработаны процедуры, обеспечивающие требуемые показатели пропускной способности ВП. В качестве основного инструмента измерения координат ВС, а также взаимодействия бортового и наземного сегментов полной системы УВД предлагается технология вещательного автоматического зависимого наблюдения (АЗН-В). Считается, что к моменту реализации этих процедур известные недостатки технологии будут устранены.

В настоящее время в научных исследованиях используют, как правило, возможности и методы имитационного моделирования (например, комплексы имитационного моделирования авиационных систем [6]), аналитические же подходы, к сожалению, еще не получили достаточного развития для их практического применения [7]. В данной статье обсуждаются родственные модели процессов обслуживания ВС и получены оценки пропускной способности с учетом приоритетности выполняемых рейсов.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В области исследований, относящихся к техническим наукам, методологию развития определяют эксперты высшей квалификации в той предметной области, ради совершенствования которой привлекаются представители компьютерных наук. В сфере воздушного транспорта это упомянутые выше аналитики ИКАО. Отправным пунктом предложений по утроению пропускной способности ВП служат возросшие инструментальные возможности точного определения местоположения ВС, совершающих полеты. Традиционные средства радиолокационного сопровождения на воздушных трассах измеряют координаты самолетов с погрешностью 600 м по высоте и дальности, 3 мин. по азимуту. Спутниковая навигация дает точность 2,5–15 м.

Для повышения пропускной способности уже в начале XXI века было предложено вновь «уплотнить» ВП, теперь по вертикали. Точность новых средств наблюдения обеспечила успех внедрения. Была разработана концепция сокращенных минимумов вертикального эшелонирования, реализованная на международных трассах. Следующий шаг – «уплотнение» ВП по горизонтали, т. е. полеты ГА по так называемым «свободным траекториям», а не только по воздушным трассам. Авиалинии оснащены радиосвязным и навигационным оборудованием, охвачены сплошным полем радиолокационного наблюдения, что обеспечивает устойчивое УВД. Новые средства наблюдения могут сопровождать ВС в любой точке планеты.

Действующая технология ОрВД основана на установленной Федеральным законом структуре ВП, опубликованной [8] Центром аэронавигационной информации (ЦАИ) и доступной любым пользователям (эксплуатантам), а также на правилах обслуживания [9] и организации потоков воздушного движения (ОПВД) [10]. В обычных условиях, когда коэффициент загрузки диспетчера (отношение времени активных действий в течение смены к ее длительности) ниже 0,7; когда самолеты «гуськом» движутся по «ниточкам» трасс; когда отсутствуют опасные явления погоды, ограничения ВП и подобное, наземные органы четко выполняют свои обязанности и поддерживают бесконфликтное, регулярное и экономичное воздушное движение. Однако при изменении условий выполнения полетов, т. е. при отказах техники, погодных ката-

клизмах, потенциально конфликтных ситуациях и других чрезвычайных событиях, безмятежное развитие воздушной обстановки нарушается, особенно вблизи аэродромов с высокой интенсивностью полетов. Как следствие, образуются очереди ожидания вылета и посадки, а транзитные рейсы направляются по обходным маршрутам.

В [2–5] предлагается совместное оперативное принятие решений по улучшению неблагоприятной воздушной обстановки группой специалистов в области ОрВД, объединенных «духом сотрудничества», с целью повышения эффективности полетов (по критерию безопасности при ограничениях на экономичность и регулярность). В этом «сообществе» представлены аналитики (разбор полетов); метеорологи; плановики, выполняющие планирование использования воздушного пространства (ПИВП) и формирование потоков ВС; авиадиспетчеры и пилоты, совершающие полеты в их секторах и под их управлением. Вводится понятие «горизонт планирования», используемое в пространственном и временном аспектах. В первом аспекте – это работа «сообщества», нацеленная на распределение каждого ВС по времени, месту и высоте, т. е. выбору маневра, расчету, согласованию, утверждению в рамках совместного обсуждения результата и его выполнению в каждой точке траектории в каждом затрагиваемом объеме ВП. Второе значение термина – это заблаговременное изучение тенденций загруженности (потребность в полетах и ограничения, сведения о пропускной способности и ресурсах) каждого «горизонта планирования», развития его технической оснащенности, изменения структуры ВП.

Возникает задача разработки математического аппарата для оценки пропускной способности ВП с учетом приоритетности рейсов. Для наглядности начнем с популярных представлений потока ВС распределением Пуассона с эрланговским временем их обслуживания.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Концептуальное представление об организации планирования и обслуживания потоков воздушного движения изложено в [5]. Рассмотрим схему центров ОрВД РФ [8], изображенную на рис. 1, которая содержит семь зональных и десятки районных центров (ЗЦ и РЦ) системы.

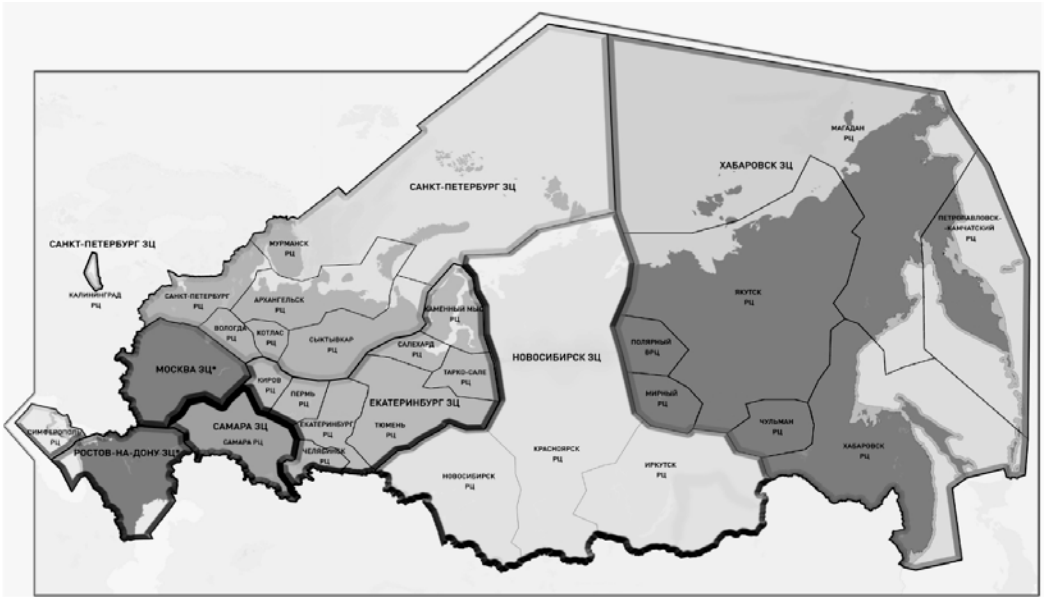

Рис. 1. Картографическая схема Единой системы ОрВД России
Fig. 1. Cartographic diagram of the Russian Federation Unified ATM System

ВП РФ представлено здесь как мозаика ячеек разного размера (определяемого интенсивностью полетов по трассам и количеством аэродромов), расположенных вплотную друг к другу.

В первом приближении – это геометрическая интерпретация термина «горизонты планирования». Формирование потоков ВС начинается с составления сезонного расписания (на полугодие). Далее, за неделю до дня выполнения полетов, наступает стратегический этап, когда принимаются меры по нейтрализации неблагоприятных явлений, которые невозможно было предвидеть в расписании (стихийные бедствия, военные учения и действия и т. д.). Накануне дня выполнения полетов вступает в силу этап предтактического планирования. В сводный план использования воздушного пространства (ИВП) включаются рейсы по дополнительным (вне расписания) заявкам владельцев ВС. В день выполнения полетов осуществляется тактический этап, на котором в каждом горизонте планирования используются меры оперативного вмешательства в процесс ОрВД при изменении условий выполнения полетов.

В [5] задачи этапов ПИВП пересмотрены. Считается, что стратегическое планирование должно включать в себя составление расписания и начинаться за несколько месяцев (и даже лет) до ввода последнего в действие. Анализ статистики использования конкретного объема ВП позволяет предвидеть вероятные события в системе и управлять ими. Предполагается, что в результате можно преобразовать существующую систему ОрВД, оперативно (по принципу обратной связи) реагирующую на неблагоприятные изменения воздушной обстановки, в систему, которая стратегически (заблаговременно) предотвращает любые возможные отклонения от норм производства полетов.

Функции этапа предтактического планирования предлагается дополнить полноценным обменом аэронавигационной информацией между пользователями (авиакомпаниями) и поставщиками услуг (персоналом системы ОрВД). В процессе координации и согласования сбалансированных на стратегическом этапе сводных планов ИВП (с учетом предпочтений и возможностей как перевозчиков, так и системы) совершенствуются процедуры прогнозирования спроса на авиатранспорт и устранения конфликтов интересов между лицами, планирующими деятельность по ИВП на годы вперед (эксплуатантами), и владельцами ВС, которые больше зависят от конъюнктуры рынка и «не могут далеко заглядывать в будущее» [5]. Равноправие в доступе к информации и взаимное понимание целей партнеров помогает оценить ежедневный резерв пропускной способности ВП. Каждому рейсу присваивают, согласно [11], государственный приоритет его обслуживания, который может изменяться в зависимости от развития воздушной обстановки (бедствие на борту, опасные атмосферные явления, отказы техники и т. д.).

В такой постановке задача оценки пропускной способности взаимодействующих ЗЦ и РЦ (горизонтов планирования) может анализироваться с помощью модели многоканальной системы с приоритетами. Каждый горизонт планирования является каналом обслуживания системы ОрВД, выполняющим функции ОПВД, реконфигурации ВП и УВД на своей территории, а также поддержания целостности информации во взаимодействующих горизонтах. Начнем с дисциплины статического (жесткого) распараллеливания.

ОПОРНАЯ МОДЕЛЬ СТАТИЧЕСКОЙ ДИСЦИПЛИНЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ

Пусть система насчитывает n каналов обслуживания и $m = n$ простейших входящих потоков с интенсивностью λ_i ($i = \overline{1, m}$) каждый. Каналам предоставлены собственные секции буферного накопителя (БН) объемами r_i мест для ожидания (рис. 2). Времена обслуживания распределены экспоненциально с параметрами μ_i. Загрузка каждого i-го канала меньше единицы $\rho_i = \lambda_i/\mu_i < 1$. Если канал занят и в БН нет свободных мест, то заявка i-го потока теряется. Возможно при этом, что часть каналов простаивает, а в k-м БН ($k = \overline{1, n}, k \neq i$) есть места для ожидания.

Модель легко представить набором n автономных одноканальных систем массового обслуживания (СМО). Вероятность π_i потери заявки i-го потока равна $\pi_i = \dfrac{\rho_i^{r_i+1}(1-\rho_i)}{1-\rho_i^{r_i+2}}$. Средние потери по всем n каналам достигают $\pi_\Sigma = \dfrac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\pi_i = \dfrac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\dfrac{\rho_i^{r_i+1}(1-\rho_i)}{1-\rho_i^{r_i+2}}$.

Модель демонстрирует характерную особенность. Возможно, именно простота постановки выдвигает ее на передний план. Вероятность потери заявки не зависит ни от приоритетности потока, которому она принадлежит, ни от соотношения $\gamma_i = \mu_1/\mu_i$ параметров обслуживания первого и i-го потоков, влияющих на эффективность одноканальных СМО. Величина π_i определяется размером БН, предоставленного i-му потоку, и создаваемой им загрузкой ρ_i. Проследим в дальнейшем, всегда ли, при переходе от одноканальной СМО к многоканальной, снижается эффективность приоритетного обслуживания или же обнаруженное выравнивание вероятностей π_i потерь заявок разных приоритетов присуще лишь данной дисциплине.

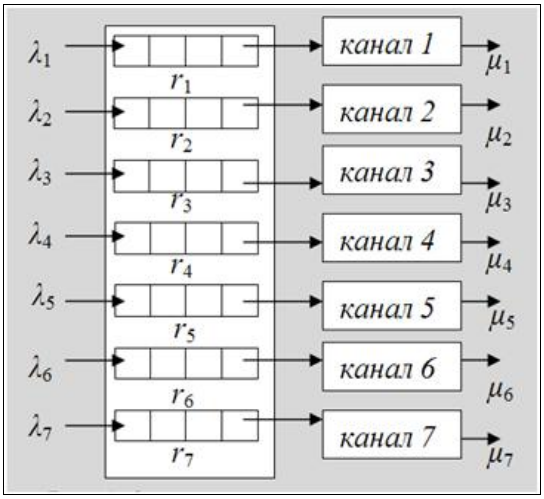

Рис. 2. Опорная статическая модель
Fig. 2. Reference static model

Для анализа влияния обобществления автономных ресурсов рассмотрим модель с общим БН. Пусть, как и прежде, СМО содержит n однотипных каналов, обслуживающих с относительным приоритетом n пуассоновских потоков с интенсивностями λ_i каждый ($i = \overline{1,n}$); времена обслуживания экспоненциальные с параметрами μ_i. Заявки принимаются с вытеснением низших приоритетов из общего БН, насчитывающего r мест для ожидания. Объединение буферной памяти создает упорядоченность на входе системы за счет отказов низким приоритетам. Возникает корреляция между потоками, управляющая заданными шкалой приоритетов отношениями предшествования. Другим содержательным отличием от модели, рассмотренной ранее, является «плавающее» (динамическое) распределение ресурса БН. Становится маловероятной ситуация, при которой заявка произвольного i-го потока, поступая в систему, застает занятым весь объем r общего БН. Заметим, что эта малая вероятность реализуется за счет требований низкого приоритета, что приводит к увеличению длительности простоя каналов их обслуживания.

ОБЩИЙ БУФЕРНЫЙ НАКОПИТЕЛЬ

Рассмотрим СМО с $m = n = 2$, на которой проследим закономерности процесса. В распоряжение заявок высоких приоритетов (ЗВП) предоставлен первый канал и БН объемом на r мест для ожидания. Вероятность π_1 их потери может быть оценена как $\pi_1 = \dfrac{\rho_1^{r_1+1}(1-\rho_1)}{1-\rho_1^{r_1+2}}$.

Очевидно, что и здесь отсутствует зависимость $\pi = f(\gamma)$, так как первый канал по условиям задачи не бывает занят заявками низких приоритетов (ЗНП). Обслуживание потока ЗВП определяется лишь его собственными характеристиками. За время обслуживания одной ЗВП в БН накапливается их очередь, наиболее вероятная длина L_1 которой, согласно известному [12] приближению $L_1 = (1 + \upsilon^2)\ \lambda T_1 = (1 + \upsilon^2)\ \rho_1$, где υ – коэффициент вариации, равный отношению среднеквадратического отклонения времени T обслуживания к его

математическому ожиданию. Параметр L_1 позволяет рассчитать величину остатка r' БН, которым по правилам вытеснения может пользоваться ЗНП, в виде $r' = r - (1 + \upsilon^2)\,\rho_1$. Тогда

$$\pi_2 = \frac{\rho_2^{r+1-(1+\vartheta^2)\rho_1}(1-\rho_2)}{1-\rho_2^{r+2-(1+\vartheta^2)\rho_1}}, \text{ если } r \geq (1+\upsilon^2)\,\rho_1.$$

При невыполнении условия $r \geq (1 + \upsilon^2)\ \rho_1$ режим обслуживания ЗНП ухудшается. Неприоритетный поток теряет возможность образовать очередь ожидания, а принадлежащие ему заявки могут занимать выделенный им канал лишь в моменты его простоя от ЗВП.

Преобразуя известную формулу для одноканальной СМО, не имеющей БН ($r = 0$), запишем $\pi_2 = \rho_2 / (1 + \rho_2)$. Подобная ситуация весьма маловероятна. Для пуассоновского потока на входе и экспоненциального времени обслуживания ($\upsilon = 1$) даже при $\rho \to 1$ наиболее вероятная длина очереди ЗВП не достигает двух заявок, т. е. ($L_1 < 2$). На рис. 3 приведены зависимости $\pi_i = f(\rho)$ для данной модели совокупности горизонтов планирования. Для равноценных по аппаратным затратам систем с параметрами $n = 2$ и $r_1 = r_2 = r/2 = 5$ общий БН при статическом разделении потоков предпочтительнее по критерию минимизации потерь заявок. Эффект объясняется динамическим использованием буферной памяти, при котором относительный сдвиг по времени «сгущений» и «разрежений» нерегулярных входных потоков компенсируется подвижными границами зон общего БН. Сказывается и восстановление отношений предпочтительности на входе СМО за счет возможности вытеснения из БН неприоритетных заявок. Обобщая модель для произвольного числа n каналов и $m = n$ входящих потоков, определим наиболее вероятную длину L_{k-1} очереди всех заявок, расположенных в шкале приоритетов выше произвольного k-го потока, в обычном [12] виде: $L_{k-1} = (1+\vartheta^2)\sum_{i=1}^{k-1}\rho_i$. Тогда формула для вероятности потери k-го типа примет вид

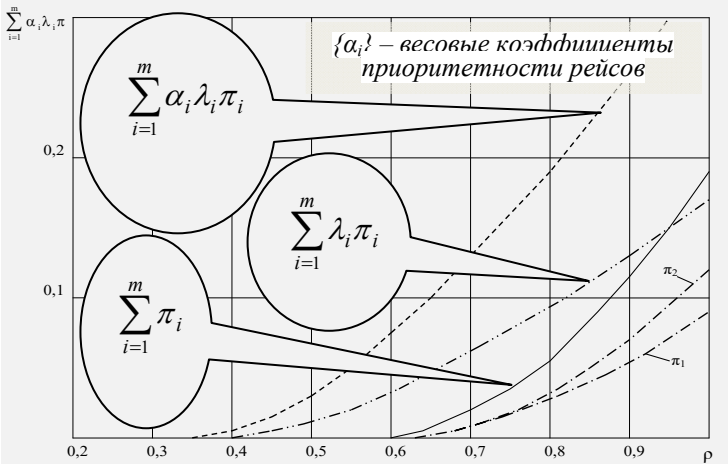

Рис. 3. Графики зависимостей $\pi_i = f(\rho)$
Fig. 3. Dependency graphs $\pi_i = f\ (\rho)$

$$\pi_k = \begin{cases} \dfrac{\rho_k^{r+1-(1+\vartheta^2)\sum_{i=1}^{k-1}\rho_i}(1-\rho_k)}{1-\rho_k^{r+2-(1+\vartheta^2)\sum_{i=1}^{k-1}\rho_i}}, & \text{если } r \geq (1+\vartheta^2)\sum_{i=1}^{k-1}\rho_i. \\ \dfrac{\rho_k}{1+\rho_k} \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

ВАРИАЦИИ МОДЕЛЕЙ ГОРИЗОНТОВ ПЛАНИРОВАНИЯ

Детализация статической дисциплины распараллеливания приводит к следующим моделям. Начнем с n-канальной системы, которая обслуживает $m < n$ пуассоновских входных потоков заявок с интенсивностями λ_i ($i = \overline{1,m}$); времена обслуживания экспоненциальные с

параметрами μ_i. Заявки принимаются в раздельные зоны БН объемами r_i каждая, причем число зон равно количеству m входных потоков. При организации работы n процессоров разделяют на m групп, каждая из которых получает в свое распоряжение один из входных потоков с приданым ему собственным БН, и n_i каналов, $i = \overline{1,m}$, $\sum_{i=1}^{m} n_i = n$. Модель представляет собой набор m многоканальных СМО, на каждую из них поступает i-й поток, который принимает БН объемом r_i мест для ожидания. Вероятность потери заявки i-го потока оценивается формулой, в которую подставляются конкретные значения r_i и n_i. Уровень приоритетности не влияет на величину π_i. Включение в СМО большего, чем m, количества буферных зон нецелесообразно, так как фактически это будет означать простое наращивание секций БН.

Интереснее случай, при котором число d разделенных приемных зон меньше, чем количество m входящих потоков, т. е. $d < m$. При этом некоторые группы из n_i каналов будут обобществлять один физический объем памяти, в котором в соответствии с наперед заданной приоритетной шкалой осуществляется размещение заявок нескольких потоков с вытеснением менее приоритетных. Правила приема создают известную упорядоченность на входе, ставя в благоприятные условия заявки высоких приоритетов. Пусть в СМО поступают d групп потоков. Каждая группа с индексом i ($i = \overline{1,d}$) насчитывает S_i пуассоновских потоков с интенсивностями λ_j ($j = \overline{1,S}$), пронумерованных в соответствии со шкалой приоритетов, сумма $\sum_{i=1}^{d} S_i = m$. Заявки j-го типа, принадлежащие i-й группе входных потоков, поступают на обслуживание S_i разными группами каналов и, в случае занятости j-й группы каналов, направляются в очередь для ожидания в i-й обобществленный БН. Для произвольно выбранного j-го потока остаток БН, свободный от заявок более высоких приоритетов, может быть приближенно оценен как $r' = \left\lceil r_i - (1+\vartheta^2)\sum_{l=1}^{i-1}\rho_l \right\rceil = \left\lfloor r_i - (1+\vartheta^2)\sum_{l=1}^{i-1}\rho_l \right\rfloor$, где символ «антье», т. е. $\lceil * \rceil$, означает округление до ближайшего целого в меньшую сторону. Тогда для расчета вероятности потери заявки j-го потока при положительном ближайшем меньшем целом вычисленной величины r' будет справедлива формула, в которую в качестве объема БН следует подставлять r', а в противном случае приравнивать r нулю. Количество n каналов СМО в формуле определяется исходя из того, сколько их назначено на обслуживание заявок j-го типа по условиям задачи.

Рассмотрим наиболее распространенную реализацию статического распараллеливания. Пусть система обслуживает m приоритетных потоков на n каналах, $m > n$. Количество разделенных секций БН равно числу m входных потоков. В этом случае m потоков заявок разделяются на n групп, каждая из которых назначается на отдельный канал. Внутри i-й группы ($i = \overline{1,n}$) осуществляется приоритетное обслуживание l_i потоков ($l_i < m$, $\sum_{i=1}^{n} l_i = m$). Вероятность потери заявки оценивается с помощью классического выражения для многоканальной СМО, работающей на l_i разделенных БН:

$$\pi = P_{n+r} = \frac{\dfrac{n^{n-1}}{(n-1)!}\rho^{n+r}(1-\rho)}{\sum_{k=0}^{n}\dfrac{n^{k-1}(n-k)}{k!}\rho^k - \dfrac{n^{n-1}}{(n-1)!}\rho^{n+r+1}}.$$

Если количество секций БН равно количеству каналов, т. е. каждый из них обслуживает l_i потоков с приоритетным приемом в i-й БН, то для определения вероятности потери заявки

следует пользоваться выражениями, полученными в [12], где $\gamma_i = \mu_1 / \mu_i$ – соотношение параметров обслуживания:

$$\pi_k = \frac{\left(\sum_{i=1}^{k}\rho_i\right)^{r-\left(1+\upsilon^2\right)\gamma_k\sum_{i=1}^{k-1}\left(\frac{\rho_i}{\gamma_i}\right)}\left(1-\sum_{i=1}^{k}\rho_i\right)}{1-\left(\sum_{i=1}^{k}\rho_i\right)^{r-\left(1+\upsilon^2\right)\gamma_k\sum_{i=1}^{k-1}\left(\frac{\rho_i}{\gamma_i}\right)+1}} + \sum_{j=k}^{m}\delta_{jk}\,\rho_j\,\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{k}\rho_i}\left\{1-\frac{\gamma_k\left[r-\left(1+\vartheta^2\right)\,\gamma_j\sum_{i=1}^{k-1}\left(\frac{\rho_i}{\gamma_i}\right)\right]}{\left(1+\vartheta^2\right)\,\gamma_j\,\rho_k}\right\},$$

если $\left(1+\vartheta^2\right)\gamma_j\sum_{i=1}^{k-1}\left(\frac{\rho_i}{\gamma_i}\right) \le r < \left(1+\vartheta^2\right)\gamma_j\sum_{i=1}^{k}\left(\frac{\rho_i}{\gamma_i}\right)$,

$$\pi_k = \frac{\left(\sum_{i=1}^{k}\rho_i\right)^{r-\left(1+\vartheta^2\right)\gamma_k\sum_{i=1}^{k-1}\left(\frac{\rho_i}{\gamma_i}\right)}\left(1-\sum_{i=1}^{k}\rho_i\right)}{1-\left(\sum_{i=1}^{k}\rho_i\right)^{r-\left(1+\vartheta^2\right)\gamma_k\sum_{i=1}^{k-1}\left(\frac{\rho_i}{\gamma_i}\right)+1}}, \text{ если } \left(1+\vartheta^2\right)\gamma_k\sum_{i=1}^{k}\left(\frac{\rho_i}{\gamma_i}\right) \le r,$$

где δ_{jk} – символ Кронекера; $j, k = \left\{\overline{1,m}\right\}$, m – количество входных потоков,

$$\pi_k = \frac{\sum_{i=1}^{k}\rho_i}{1+\sum_{i=1}^{k}\rho_i}, \text{ если } \left(1+\vartheta^2\right)\gamma_j\sum_{i=1}^{k-1}\left(\frac{\rho_i}{\gamma_i}\right) > r.$$

Обобщим модель статического распараллеливания m потоков заявок на $n = m$ каналов с приоритетным приемом в общий БН для произвольного соотношения $m \ne n$ (рис. 4).

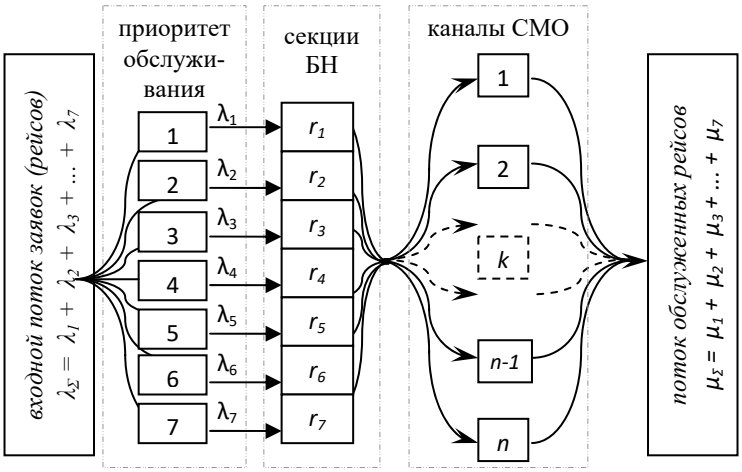

Рис. 4. Система с относительными приоритетами
и приоритетным приемом заявок в секции БН
Fig. 4. System with relative priorities
and priority reception of applications in the buffer section

Пусть $n < m$, что соответствует реальной ситуации. Ее можно представить суперпозицией n обслуживающих каналов, каждый из которых обрабатывает заявки j-й группы пуассоновских потоков ($j = \overline{1,n}$), накапливаемых в динамически изменяющейся зоне общего БН, свободной от ЗВП. Размер r_j этой зоны можно приближенно рассчитать как

$$r_j = r - (1+\vartheta^2)\left(\sum_{s=k_j+1}^{l_j} \delta_{ks}\gamma_{l_j} \sum_{i=1}^{s} \frac{\rho_i}{\gamma_i} + \sum_{p=l_j+1}^{m} \delta_{kp}\gamma_m \sum_{s=1}^{p-1} \sum_{i=1}^{l_s} \frac{\rho_i}{\gamma_i} \right),$$

где k_j – индекс произвольного потока, входящего в j-ю группу, $k_j = \overline{1,l_j}$; $\sum_{j=1}^{m} l_j = m$; δ_{kp} – символ Кронекера, учитывающий переполнение общего БН заявками высоких приоритетов в сеансах обслуживания заявок низких приоритетов. Далее, двойная сумма до $p - 1$ учитывает заполнение БН заявками потоков, принадлежащих группам более высокой, чем j, приоритетности, в сеансах обслуживания заявок потоков, принадлежащих группам низшей приоритетности; сумма до s – то же относительно k-го потока заявок внутри j-й группы, в которой производится обслуживание с относительными приоритетами l_j самостоятельных потоков.

Рассматриваемая модель вписывается в рамки ограничений, оговоренных перед выводом приближенной формулы для одноканальной модели [12]. При ее использовании вместо r следует подставлять r_j. При $(1+\vartheta^2) \sum_{p=l_j+1}^{m} \delta_{kp}\gamma_m \sum_{s=i}^{p-1} \sum_{i=1}^{l_s} \frac{\rho_i}{\gamma_i} > r_j$ потери по любому k_j-му входящему потоку, принадлежащему j-й группе, рассчитываются как для системы с $r = 0$.

$$\pi_k = \frac{\left(\sum_{i=1}^{k} \rho_i\right)^{r_k} \left(1 - \sum_{i=1}^{k} \rho_i\right)}{1 - \left(\sum_{i=1}^{k} \rho_i\right)^{r_k+1}}, \text{ если для всех } j = \overline{k+1,m} \text{ справедливо } (1+\vartheta^2)\gamma_j \frac{\rho_k}{\gamma_k} \le r_k;$$

$$\pi_k = \frac{\left(\sum_{i=1}^{k} \rho_i\right)^{r_k} \left(1 - \sum_{i=1}^{k} \rho_i\right)}{1 - \left(\sum_{i=1}^{k} \rho_i\right)^{r_k+1}} + \sum_{j=1}^{m} \delta_{jk}\, \rho_j \frac{1 - \left(\sum_{i=1}^{k} \rho_i\right)^{r_k}}{1 - \left(\sum_{i=1}^{k} \rho_i\right)^{r_k+1}} \left[1 - \frac{r_k \cdot \gamma_k}{(1+\vartheta^2)\cdot \gamma_j \cdot \rho_k} \right], \text{ где}$$

если хотя бы для одного j, $j = \overline{k+1,m}$, $(1+\vartheta^2)\gamma_j \frac{\rho_k}{\gamma_k} > r_k$ и очередь

$$Q_k = (1+\vartheta^2)\, \rho_k \sum_{i=1}^{k-1} \gamma_i \left[1 - \left(\frac{\rho_i}{\gamma_i} \right)^{l_i+1} \right] \Big/ \left(1 - \frac{\rho_i}{\gamma_i} \right) \le r_k;$$

$$\pi_k = \frac{\left(\sum_{i=1}^{k}\rho_i\right)^{r_k}\left(1-\sum_{i=1}^{k}\rho_i\right)}{1-\left(\sum_{i=1}^{k}\rho_i\right)^{r_k+1}} + \sum_{j=1}^{m}\delta_{jk}\,\rho_j\,\frac{1-\left(\sum_{i=1}^{k}\rho_i\right)^{r_k}}{1-\left(\sum_{i=1}^{k}\rho_i\right)^{r_k+1}}\left[1-\frac{r_k\,\gamma_k}{(1+\vartheta^2)\,\gamma_j\,\rho_k}\right]\times$$

$$\times\, r_k \Bigg/ \left\{(1+\vartheta^2)\,\rho_k\sum_{i=1}^{k-1}\gamma_i\left[1-\left(\frac{\rho_i}{\gamma_i}\right)^{l_i+1}\right]\Bigg/\left(1-\frac{\rho_i}{\gamma_i}\right)\right\},$$

если хотя бы для одного j, $j=\overline{k+1,m}$, $\left(1+\vartheta^2\right)\gamma_j\,\dfrac{\rho_k}{\gamma_k} > r_k$ и $Q_k > r_k$.

Это означает, что вероятность обслуживания заявки произвольного k-го потока, независимо от уровня его приоритетности, есть вероятность P_{Ok_j} застать j-й обслуживающий канал свободным, а вероятность потери заявки есть ее дополнение до единицы

$$\pi_{k_j} = 1 - P_{Ok_j} = \frac{\sum_{s=1}^{j-1}\sum_{i=1}^{l_s}\rho_i + \sum_{i=1}^{k_j}\rho_i}{1+\sum_{s=1}^{j-1}\sum_{i=1}^{l_s}\rho_i + \sum_{i=1}^{k_j}\rho_i}.$$

Наконец, при $n > m$ модель представляет собой совокупность нескольких многоканальных СМО, обслуживающих каждая один k-й поток, $k=\overline{1,m}$, использующих каждая свою собственную k-ю динамическую секцию общего БН, объем которой вычисляется как $r_k = \min\left[0,\left\lceil r-(1+\vartheta^2)\cdot\sum_{j=k+1}^{m}\delta_{jk}\cdot\gamma_j\cdot\sum_{i=1}^{k-1}\frac{\rho_i}{\gamma_i}\right\rceil\right]$. Обозначенное здесь ближайшее большее неотрицательное целое вычисленной величины подставляется в выражения для оценки вероятности потери заявки по k-му потоку в такой системе.

В каждой модели наиболее вероятное время T_{wk} ожидания обслуживания заявки k-го потока рассчитывается [12] как произведение вычисленной длины L_{k-1} очереди всех заявок более высоких приоритетов и среднего времени $T_i = 1/\mu_i$ обслуживания каждой из них (i = 1, 2, ..., k–1) $T_{wk} = L_{k-1} = (1+\vartheta^2)\sum_{i=1}^{k-1}\rho_i$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Материалы данной статьи являются лишь первым шагом на пути разработки аналитического аппарата для оперативной оценки пропускной способности элементов структуры ВП при изменении условий выполнения полетов. В исследованных здесь моделях статической дисциплины обслуживания постулируется, что весь спектр текущих задач ОрВД решается внутри каждого горизонта планирования, без взаимодействия с соседними и удаленными центрами единой системы. Возможность учета таких связей предоставляют модели динамической дисциплины, в которых изменяющаяся загрузка элементов может перераспределяться между взаимодействующими горизонтами планирования. Подготовлена статья, восполняющая этот пробел.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воздушный кодекс РФ. Федеральный закон № 60-ФЗ от 19.03.97 // Собр. законодательства РФ. – 2012.

2. Глобальная эксплуатационная концепция ОрВД. Документ 9854 AN/458. ИКАО. Монреаль, 2012.

3. Руководство по совместной организации потоков воздушного движения. Документ 9971 AN/485. ИКАО. Монреаль, 2012.

4. Руководство по управлению общесистемной информацией. Документ 10039 AN/511. ИКАО. Монреаль, 2012.

5. Руководство по полетам и потокам движения: информация для совместного использования воздушного пространства (FF-ICE). Документ 9965 AN/483. ИКАО. Монреаль, 2012.

6. Программный комплекс имитационного моделирования процессов организации и управления воздушным движением (КИМ УВД). Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005612007 от 08.08.2005 / О.В. Дегтярев, В.П. Егорова, И.Ф. Зубкова и др.

7. Кузнецов В.Л., Филонов П.В., Чепурина А.А. Метод построения системы квантовых состояний в модели расчета пропускной способности аэропорта // Научный Вестник МГТУ ГА. 2012. № 184.

8. Сарайский Ю.Н., Алешков И.И. Аэронавигация. Часть I. Основы навигации и применение геотехнических средств: учебное пособие. СПб.: СПбГУ ГА, 2010.

9. Типовые технологии работы диспетчеров органов обслуживания воздушного движения (управления полетами) при аэронавигационном обслуживании пользователей воздушного пространства Российской Федерации. Утв. Приказом Росаэронавигации № 108 от 14.11.07, зарегистрировано в Минюсте 21.12.07, № 10797.

10. Федеральные авиационные правила «Организация планирования использования воздушного пространства Российской Федерации». Утв. Приказом Минтранса РФ от 16.01.12. № 6, Минтранса РФ от 16.01.12. № 6, зарегистрировано в Минюсте РФ 22.0312, № 23577.

11. Табель сообщений о движении воздушных судов в Российской Федерации. Утв. Приказом Минтранса РФ от 24.01.2013 № 13, зарегистрировано в Минюсте РФ 23.05.13, № 28488.

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Жильцов Илья Евгеньевич, аспирант МГТУ ГА, frostsaberr@gmail.com.

Митрофанов Артем Константинович, авиадиспетчер МЦ АУВД, s7arts-7artem@mail.ru.

Рудельсон Лев Ефимович, доктор технических наук, профессор, профессор МГТУ ГА, l-rudelson44@yandex.

AIR SPACE CAPACITY ASSESSMENT REGARDING THE PROBLEM OF THE COLLABORATIVE MANAGEMENT OF AIR TRAFFIC FLOWS

Ilya E. Zhiltsov[1], Artem K. Mitrofanov[2], Lev E. Rudel'son[1]

[1]Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

[2] Moscow Air Traffic Control Centre, Moscow, Russia

ABSTRACT

Air transportation industry traditionally stays on the cutting edge of technology. Feats of engineering are introduced during aircraft design and operation, airfields and airways arrangement, radio technology development. In order to raise the economic efficiency, air transportation providers increase airspace capacity. Experts of the International Civil Aviation Organization (ICAO) are planning to triple the achieved quantitative indicators by 2025 both on the basis of growing

scientific and technical potential and through the improvement of air traffic management. Technically, such a rise is due to the development of the satellite navigation, but it requires updating of the flight regulation rules. This gap is filled in the ICAO regulatory documents where the technology which guarantees the required air space capacity indicators on the basis of the operational coordination of specialists (the totality of the so-called "planning horizons") has been developed. At present, there is no analytical apparatus for the optimal choice of new technologies practical realization; only universal means are known (for example, simulation modeling of aviation systems). This article discusses several related analytical models of flight control processes and air space capacity assessments on a flight priority basis are given. Each flight corresponds to the state priority of its service, which can vary depending on the development of the situation in the air (distress on board, hazardous atmospheric phenomena, equipment failures, etc.). The problem of the interacting planning horizons capacity assessment is analyzed using a model of a multichannel system with priorities. Each planning horizon is a service channel that performs the functions of air traffic flow management, restructuring the space and the management process on its territory, as well as maintaining the integrity of information in the interacting horizons. The evaluation criteria which worked well in practice are indicators of the average service waiting time and the probability of failure which is thought of such events as the direction of the aircraft to the alternate aerodrome, missed approach procedure, departure delay and other significant deviations from the balanced daily plan of airspace use.

Key words: air traffic management, airspace use, models of planning horizons, service disciplines with priorities, organization of aircraft flows.

REFERENCES

1. *Vozdushnyy kodeks RF. Federal'nyy zakon № 60-FZ ot 19.03.97* [The Air Code of the Russian Federation. Federal Law No. 60-FZ of 19.03.97]. Coll. legislation of the Russian Federation. – 2012. (in Russian)

2. Global ATM operational concept. Document 9854 AN/458. ICAO. Montreal, 2012. (in Russian)

3. Manual on Collaborative Air Traffic Flow Management, Doc. 9971 AN/485. ICAO. Montreal, 2012. (in Russian)

4. Manual on System Wide Information Management (SWIM) Concept, Doc. 10039 AN/511. ICAO. Montreal, 2012. (in Russian)

5. Manual on Flight and Flow – Information for a Collaborative Environment (FF-ICE), Doc. 9965 AN/485. ICAO. Montreal, 2012. (in Russian)

6. Degtyarev O.V., Egorova V.P., Zubkova I.F., Kan A.V., Orlov V.S. *Programmnyy kompleks imitatsionnogo modelirovaniya protsessov organizatsii i upravleniya vozdushnym dvizheniyem (KIM UVD). Svidetel'stvo ob ofitsial'noy registratsii programmy dlya EVM № 2005612007 ot 08.08.2005* [The program complex of simulation modeling of the processes of organization and control of air traffic (KIM ATC)]. Certificate of official registration of the computer program No. 2005612007 of 08.08.2005. (in Russian)

7. Kuznetsov V.L., Filonov P.V., Chepurina A.A. *Metod postroyeniya sistemy kvantovykh sostoyaniy v modeli rascheta propusknoy sposobnosti aeroporta* [The Quantum States System Constructing Method in Airport Throughput Computation Model]. Seientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, 2012, no. 184. (in Russian)

8. Saraysky Yu.N., Aleshkov I.I. *Aeronavigatsiya. Chast' I. Osnovy navigatsii i primeneniye geotekhnicheskikh sredstv* [Air navigation. Part I. The fundamentals of navigation and the application of geotechnical means: Tutorial of SPb: SPbGU GA], 2010. (in Russian)

9. *Tipovyye tekhnologii raboty dispetcherov organov obsluzhivaniya vozdushnogo dvizheniya (upravleniya poletami) pri aeronavigatsionnom obsluzhivanii pol'zovateley vozdushnogo prostranstva Rossiyskoy Federatsii* [Typical technologies for air traffic controllers (flight control) dispatchers in air navigation services for users of the airspace of the Russian Federation]. Approved by the Order of Rosaeronavigatsiya No. 108 of 14.11.07, registered with the Ministry of Justice on 21.12.07, No. 10797. (in Russian)

10. *Federal'nyye aviatsionnyye pravila "Organizatsiya planirovaniya ispol'zovaniya vozdushnogo prostranstva Rossiyskoy Federatsii"* [Federal Aviation Regulations "Organization of Air-

space Planning of the Russian Federation"]. Approved by the Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation of 16.01.12. No. 6, registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 22.0312, No. 23577. (in Russian)

11. *Tabel' soobshcheniy o dvizhenii vozdushnykh sudov v Rossiyskoy Federatsii* [Reporting table on the movement of aircraft in the Russian Federation]. Approved by Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation of January 24, 2013 № 13, registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on May 23, No. 28488. (in Russian)

12. Rudel'son L.E. *Programmnoye obespecheniye avtomatizirovannykh sistem upravleniya vozdushnym dvizheniyem. Chast' I. Sistemnoye programmnoye obespecheniye. Kn. 2. Operatsionnyye sistemy real'nogo vremeni* [Software for Automated Air Traffic Control Systems]. Part I. System Software. Book 2. Real-time operating systems: tutorial. M.: MSTUCA, 2007. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ilya E. Zhiltsov, Postgraduate Student, Moscow State Technical University of Civil Aviation, frostsaberr@gmail.com.

Artem K. Mitrofanov, Air Traffic Controller, Moscow Air Traffic Control Centre, s7arts-7artem@mail.ru.

Lev E. Rudel'son, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow State Technical University of Civil Aviation, l-rudelson44@yandex.ru.

Поступила в редакцию	27.10.2017	Received	27.10.2017
Принята в печать	14.03.2018	Accepted for publication	14.03.2018