

УДК 629.7.07

КОМБИНИРОВАННАЯ ИМИТАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ АЭРОДРОМНОЙ ВОЗДУШНОЙ ЗОНЫ

В.Л. КУЗНЕЦОВ, А.И. ГОРЧАКОВ

В работе развивается подход к задаче оценки пропускной способности воздушной аэродромной зоны, основанный на идее «квантования» воздушного пространства, перехода в дискретное время при наложении ограничений на заполнение квантовых состояний воздушными судами [4–6]. Показано, что такой формализм позволяет существенно снизить трудоемкость задачи имитационного моделирования движения воздушных судов в аэродромной зоне, учесть ограничения, накладываемые на ее пропускную способность пересечениями маршрутов прилета и вылета ВС. В статье приводятся результаты проведенного имитационного эксперимента, иллюстрирующие зависимость пропускной способности зоны от количества пересечений маршрутов воздушных судов.

Ключевые слова: пропускная способность аэродрома, квантование воздушного пространства, имитационный эксперимент.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время вопросам моделирования систем организации воздушного движения (ОрВД) и их компонент – процессов планирования и управления воздушным движением (УВД), уделяется большое внимание. Одним из важнейших параметров, ограничивающих возможности УВД, является пропускная способность аэродрома. Следует отметить, что утвержденные в настоящий момент методики [1] и международные рекомендации [2] по этому вопросу носят сугубо инженерный характер и базируются на излишне упрощенных моделях, не позволяющих глубоко анализировать вопросы оптимизации пропускной способности аэродрома. В частности, пропускную способность аэродрома отождествляют с пропускной способностью взлетно-посадочных полос, не принимая во внимание ограничения, возникающие в воздушном пространстве аэродромной зоны, связанные с пересечением траекторий движения взлетающих и заходящих на посадку воздушных судов (ВС).

В силу сложности аналитического решения задач УВД в настоящее время в научных исследованиях используют возможности и методы имитационного моделирования. Сейчас в мире выделяют уже более десятка различных комплексов имитационного моделирования, различающихся отдельными, порой очень существенными аспектами решаемых задач [3]. Как правило, аналитика в таких комплексах используется для описания динамики ВС с целью максимального приближения имитируемой картины воздушной обстановки к реально складывающейся. По существу, применение такой аналитики приводит как к росту адекватности модели (желаемый результат), так и к резкому увеличению потребных ресурсов вычислительной техники и, соответственно, времени, затрачиваемого на расчет (плата за результат). Компромисс между требованиями адекватности и простоты модели решается в пользу адекватности. Однако в конкретной задаче УВД о пропускной способности аэродромной воздушной зоны, предполагающей максимально плотную «упаковку» ВС в воздушном пространстве, этот компромисс можно сместить в сторону требования простоты модели.

В представляемой работе развивается подход к задаче о пропускной способности аэродрома, основанный на предложенном ранее способе формализации – абстрактной структуризации воздушного пространства [4–6], в результате которой аналитический этап моделирования позволяет существенно снизить уровень сложности модели, подвергаемой имитационному эксперименту.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОСНОВНЫЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ МОДЕЛИ

Рассмотрим аэродром, работающий по пропускной способности на пределе своих возможностей. Будем полагать, что структура воздушного пространства аэродромной зоны задана. Схематично она представлена на рис. 1. Это значит, что известны все геометрические параметры маршрутов прилета и вылета ВС – их SID (Standard Instrument Departure) и STAR (Standard Terminal Arrival Route), а также точки на карте и высотные эшелоны их пересечений.

Заданными считаются также статистические данные о частоте прибытия и отлета ВС по воздушным трассам, подходящим к рассматриваемой аэродромной зоне, а следовательно, и все соответствующие вероятности, описывающие входные и выходные потоки ВС.

Целью имитационного эксперимента является оценка максимальных интенсивностей встречных потоков ВС, бесконфликтно проходящих воздушное пространство аэродромной зоны. Эти интенсивности и определяют пропускную способность аэродрома.

В качестве основных приближений модели будем полагать выполнение следующих условий.

1. Все ВС технически исправны, а экипажи строго выдерживают предписанный план полета, двигаясь по маршрутам друг за другом (векторение не допускается).

2. Все ВС принадлежат одному классу, поэтому продольные интервалы эшелонирования в каждой данной точке пространства одинаковы для всех ВС.

3. Все ВС обладают равным приоритетом, обслуживаются в порядке прибытия и, в случае необходимости, задерживаются в зоне ожидания на границе района аэродрома.

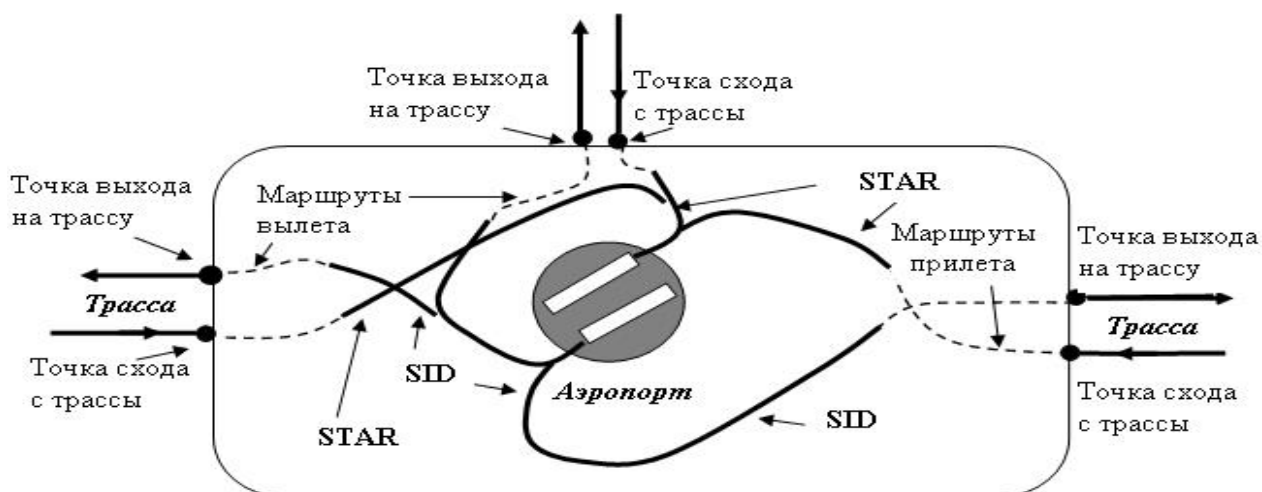


Рис. 1. Схематичное представление структуры воздушного пространства в зоне аэродрома

2. МЕТОД КВАНТОВАНИЯ АЭРОДРОМНОГО ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА

2.1. Основные положения метода

Основная идея развиваемого метода заключается в том, что при расчете пропускной способности воздушной зоны аэродрома плотность потоков взлетающих и заходящих на посадку ВС должна быть максимально высокой при условии соблюдения норм эшелонирования. При этом необходимо учитывать, что ВС, находящимся на определенном эшелоне и удаленности от ВПП, предписывается некоторая рекомендуемая скорость движения, а на SID/STAR должно реализовываться стационарное движение.

Мысленно очертим вокруг всех ВС, движущихся в воздушном аэродромном пространстве, области в виде прямоугольных параллелепипедов, ориентированных по направлению скорости ВС. Договоримся сразу, что линейные размеры этих областей должны быть не меньше

установленных норм эшелонирования. Конфигурация мгновенного расположения ВС в воздушном пространстве должна быть такова, что построенные параллелепипеды не накладываются друг на друга. Это ограничение связано с тем, что факт наложения параллелепипедов однозначно приводит к нарушению норм эшелонирования, ВС оказываются ближе друг к другу, чем это предписано Федеральными авиационными правилами [7].

Поскольку все ВС, согласно допущению модели, двигаются строго вдоль своих SID/STAR, то естественно сделать вывод о том, что и выделенные прямоугольные параллелепипеды двигаются вдоль этих линий. В предельном случае они двигаются непосредственно друг за другом.

Однако такая динамическая картина представления потоков ВС может быть существенно упрощена, если перейти в дискретное время с периодом квантования, равным времени, за которое некоторый выделенный параллелепипед займет положение предыдущего. Это время τ определяется из условия:

$$\tau = \max \left\{ \tau_{взл}, \tau_{посад}, \left\{ \frac{L_i}{V_i} \right\} \right\}. \quad (1)$$

Здесь $\tau_{взл}, \tau_{посад}$ – времена занятости ВПП при взлете и посадке, L_i – значения минимумов продольного эшелонирования на i -м участке траектории ($1 \leq i \leq P$, P – число квантовых состояний от ВПП до точки выхода на трассу), а V_i – соответствующая плановая скорость ВС. Теперь линейный размер выделенного объема (параллелепипеда) в направлении SID/STAR на i -м участке определяется по формуле $L_i = V_i \cdot \tau \geq L_i$.

Переход в дискретное время позволяет «остановить» движение параллелепипедов, сводя изменение конфигурации ВС в воздушном пространстве к скачкообразным переходам из одного «кванта пространства» в другой, следующий по ходу движения.

Следующий шаг в унификации модели связан с введением т.н. путевых координат – расстояний, измеренных вдоль соответствующих SID/STAR от ВПП до точек нахождения ВС.

Если теперь высоту положения ВС связать с занимаемым им вертикальным эшелоном, то топологически сложную картину распределения

ВС в пространстве аэродрома можно заменить простой прямоугольной матрицей (техн.), где в горизонтальной строке последовательно зафиксированы положения квантованных элементов воздушного пространства, находящихся на разном удалении от ВПП, а столбцы описывают вертикальное эшелонирование. Добавив теперь некоторые ограничения на эволюцию заполнения матрицы взлетающими и заходящими на посадку ВС, получаем простую и наглядную картину воздушной обстановки в зоне аэродрома (рис. 2). Каждая «строка» соответствует своему эшелону по высоте, а «столбец» – удалению от ВПП. Кружками помечены заполненные в данный момент времени квантовые состояния, т.е. состояния, в которых находятся ВС. Другие состояния свободны.

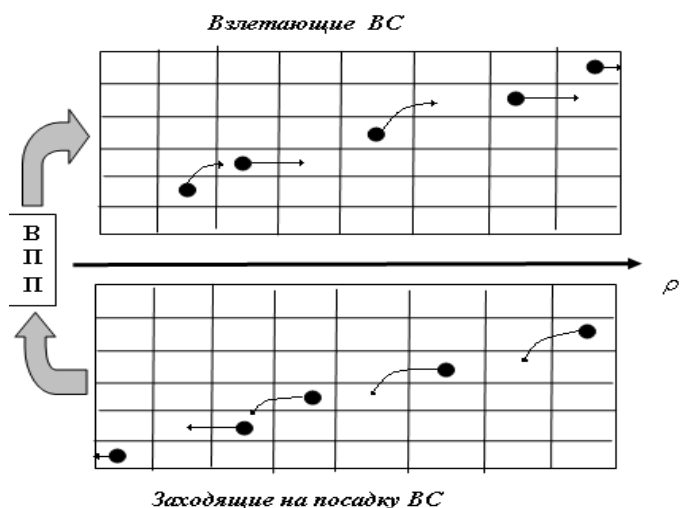


Рис. 2. Иллюстрация картины воздушной обстановки в зоне аэропорта в формализме квантования воздушного пространства

Стрелками указаны переходы ВС в новые состояния на следующем временном такте.

По мере приближения к ВПП заходящие на посадку ВС будут занимать все более низкие эшелоны по высоте. При этом в каждом квантовом состоянии по-прежнему может находиться

не более одного ВС. Принимая во внимание синхронность перемещений всех ВС в квантованном воздушном пространстве, приходим к заключению о том, что в каждом «столбце» нашего пространства может находиться не более одного заходящего на посадку (или, аналогично, взлетающего) ВС. Такой столбец ассоциируется с вектором $\vec{\psi}^+ = (0, 0, 1, 0, \dots, 0)^T$ в K -мерном пространстве (K – полное число эшелонов по высоте в воздушной зоне аэродрома), компоненты которого в основном нули (соответствуют отсутствию ВС на данном эшелоне), и лишь одна компонента вектора $\vec{\psi}^+$ может равняться единице (состояние занято). Вектор $\vec{\psi}^-$ описывает заходящие на посадку, а вектор $\vec{\psi}^+$ – взлетающие ВС.

При рассмотрении всего квантованного пространства удобно перейти к описанию с помощью векторных полей $\vec{\psi}_n^\mp(t', \rho')$. Здесь t' – текущий момент времени, $t' \in \mathbf{Z}$, ρ' – порядковый номер столбца (удаленность от ВПП, $1 \leq \rho' \leq P$). Индекс n фиксирует рассматриваемую траекторию SID или STAR. Здесь и далее мы перешли к безразмерному времени – $t' = t/\tau$, а расстояние ρ' до ВПП измеряем числом квантовых состояний, как это отмечено на рис. 3. Далее, для простоты обозначений, штрихи у t' и ρ' будем опускать.

Пересечения возможных траекторий полета взлетающих и заходящих на посадку ВС и ограничения на реализации таких полетов, обусловленные наличием минимумов эшелонирования, в предложенном методе реализуются с помощью т.н. стационарного матричного поля критических перекрытий («минного поля» в работах [4–6]). Это поле – $\hat{R}(\rho_1, \rho_2)$, выделяет пары столбцов состояний с координатами (ρ_1, ρ_2) для взлетающих и заходящих на посадку ВС соответственно, в которых могут возникать конфликты между ВС. Для таких пар $\hat{R}(\rho_1, \rho_2)$ – единичная матрица, для остальных – нулевая.

2.2. Моделирование ветвлений и слияний маршрутов прилета и вылета ВС

Описанное выше и изображенное на рис. 2 графическое представление квантованного воздушного пространства справедливо для простого случая, когда в зоне аэродрома реализуется только один маршрут вылета (с соответствующим SID) и один маршрут прилета (с соответствующим STAR). Понятно, что такое упрощение имеет право на существование лишь как иллюстративный пример, разъясняющий первые основные шаги метода. Основные проблемные ситуации в воздушном пространстве возникают при пересечении траекторий взлетающих и заходящих на посадку ВС,двигающихся по разным маршрутам. Для получения адекватной в отношении описания эффектов ветвления и слияния маршрутов ВС модели воздушного пространства, при сохранении преимуществ описанной выше структуры, используем следующий прием.

Объединим квантованные элементы пространства, соответствующие как всем разрешенным маршрутам прилета и STAR, так и маршрутам вылета и SID, сформировав новое пространство, подобно тому как это изображено на рис. 3. Здесь вертикальные пунктирные линии – границы слияния (разделения) маршрутов. Левее этих линий объединенные маршруты тождественно совпадают. Темные полосы – иллюстрация для областей поля критических перекрытий. ВС, попавшие в эти полосы на одинаковом высотном эшелоне, конфликтуют. В таком расширенном пространстве векторы $\vec{\psi}^\pm$ для каждого сечения по «дальности» будут представлять собой блочный столбец, блоки которого будут выступать векторы $\vec{\psi}_i^\pm, i = \overline{1, m}$, где m – общее количество различных разрешенных маршрутов. Однако, как и в простейшем случае с одним маршрутом прилета и одним маршрутом вылета, модуль вектора $\vec{\psi}^\pm = (\vec{\psi}_1^\pm, \vec{\psi}_2^\pm, \dots, \vec{\psi}_m^\pm)^T$ может принимать только два значения – нуль или единицу, поскольку ограничения, связанные с пропускной способностью ВПП, сохраняются. Дру-

гими словами, на расстоянии $\rho_k = k$ (в выбранных единицах дальности) на всей совокупности разрешенных маршрутов вылета (прилета) может находиться не более одного ВС.

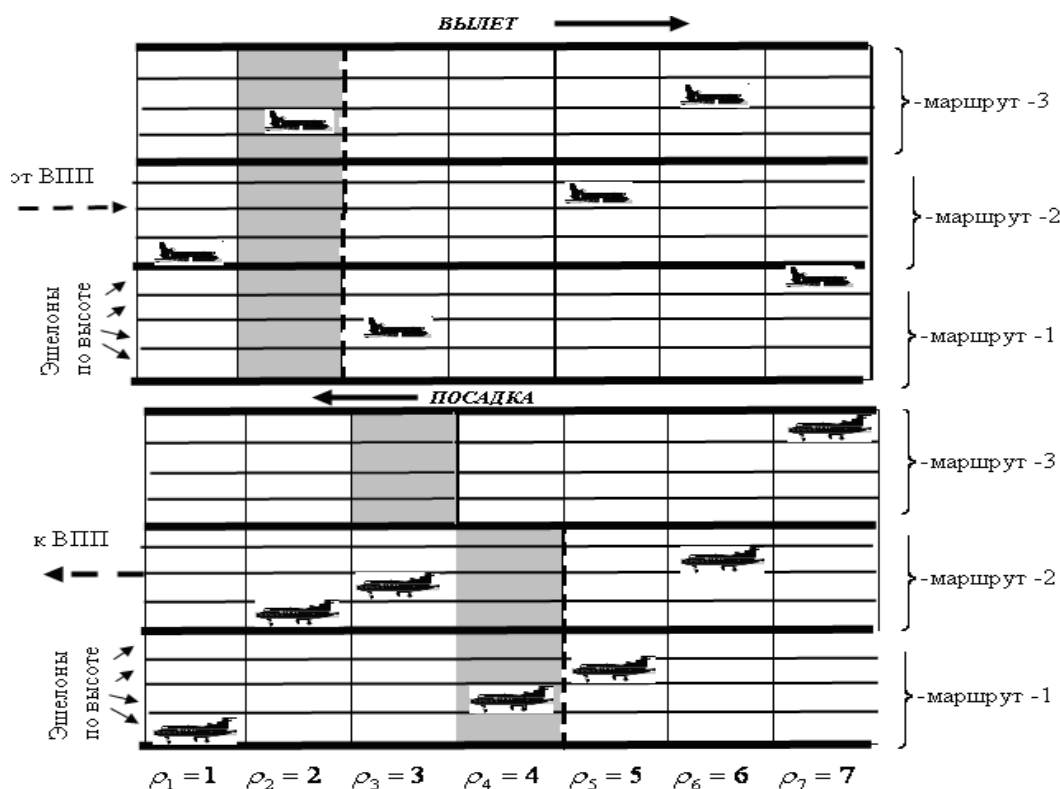


Рис. 3. Схематическое изображение расширенной квантованной воздушной зоны аэродрома с тремя воздушными трассами

Отметим еще одну особенность расширенной квантованной модели воздушной зоны. В предложенном подходе на первоначальном этапе теряется информация о точках слияния SID и STAR, соответствующих разным трассам. Так, ВС, удаленные на расстояния ρ_1 и ρ_2 от ВПП, могут находиться физически на одной линии STAR, хотя на схеме они принадлежат разным маршрутам. На эту особенность можно было бы и не обращать внимания, если бы не необходимость учета пересечений SID и STAR при расчете пропускной способности воздушного пространства. Точки объединения STAR (ветвления SID) обозначим вертикальными пунктирными линиями (рис. 3), полагая, что левее этих линий соответствующие траектории движения ВС совпадают. Ниже мы покажем, как вопрос учета слияния (ветвления) решается за счет расширения матричного поля критических перекрытий квантовых состояний ВС в аэродромной воздушной зоне.

2.3. Матричное поле критических перекрытий квантовых состояний в аэродромной воздушной зоне

В расширенной квантовой модели наличие разных маршрутов ВС можно учесть, введя блочную матрицу $\hat{\mathbf{R}}$ с блоками $\hat{R}_{n,m}(\rho_1, \rho_2) = \hat{R}(\rho_1, \rho_2)$ для маршрутов n и m , чьи SID и STAR на интервале указанных расстояний совпадают. Так, в примере, проиллюстрированном на рис. 3, STAR первого и второго маршрутов сливаются при $\rho = \rho_4$, а соответствующие SID ветвятся при $\rho = \rho_3$. Поэтому матричное поле критических перекрытий для рассматриваемого случая в точке (ρ_2, ρ_4) будет представимо матрицей $\hat{\mathbf{R}}(\rho_2, \rho_4)$ вида:

$$\hat{\mathbf{R}}(\rho_2, \rho_4) = \begin{pmatrix} \hat{R} & \hat{R} & 0 \\ \hat{R} & \hat{R} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Здесь \hat{R} – матрица перекрытий пары маршрутов, а 0 – нулевая матрицы.

STAR третьего маршрута пересекается с SID в точке (ρ_2, ρ_3) . Для нее $\hat{\mathbf{R}}(\rho_2, \rho_3)$ имеет вид:

$$\hat{\mathbf{R}}(\rho_2, \rho_4) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \hat{R} \end{pmatrix}$$

На рис. 3 такие критические перекрытия соответствуют серым столбцам.

Существенно, что матричное поле критических перекрытий зависит лишь от геометрии линий SID и STAR в обычном координатном пространстве и не зависит от времени.

3. УРАВНЕНИЯ СОВМЕСТНОЙ ДИНАМИКИ ПОТОКОВ ВЗЛЕТАЮЩИХ И ЗАХОДЯЩИХ НА ПОСАДКУ ВС

В расширенной модели воздушного пространства со временем ВС не только смещаются, приближаясь или удаляясь от ВПП, но и меняют свой высотный эшелон, оставаясь, однако, в полосе своего маршрута. Для описания этого процесса, рассматриваемого как результат управления, введем матричные поля $\hat{U}^\pm(t, \rho)$, такие, что:

$$\vec{\psi}^\pm(t+1, \rho \pm 1) = \hat{U}^\pm(t, \rho) \cdot \vec{\psi}^\pm(t, \rho). \quad (2)$$

Для описания движения конкретного ВС необходимо учитывать все предшествующие моменту t управления. Это удобно реализовать, если перейти к новым переменным: $\xi = (t - \rho / \tau)$ – для взлетающих и $\eta = [t - (L - \rho) / \tau]$ – для заходящих на посадку ВС. Здесь L – полная длина квантованной зоны, а τ – период дискретизации времени (1). Тогда (2), например, для взлетающих ВС можно переписать в виде:

$$\vec{\psi}^+(\xi, \rho + 1) = \hat{U}^+(\xi, \rho) \cdot \vec{\psi}^+(\xi, \rho), \quad (3)$$

где матрица $\hat{U}^+(\xi, \rho)$ при фиксированном значении ξ задает все управления в воздушной зоне аэродрома для ВС, взлетевшего с ВПП в момент времени ξ .

Требование бесконфликтности пролета ВС во встречных потоках можно записать в виде

$$\left(\vec{\psi}^+(\xi, \rho_1), \hat{\mathbf{R}}(\rho_1, \rho_2) \cdot \vec{\psi}^-(\eta, \rho_2) \right) = 0, \quad (4)$$

где параметры ξ и η связаны простым соотношением $\xi + \rho_1 = \eta + L - \rho_2$, вытекающим из условия одновременности входа конфликтующих ВС в зону критического перекрытия. Задание пар

(ξ, η) является необходимым при корреляции моментов взлета/посадки и номеров трасс прилета/вылета.

При невыполнении условия (4) одно из ВС конфликтующей пары должно быть исключено из рассмотрения, а соответствующее управление, например, $\hat{U}^+(\xi, \rho_1)$ – обнуляется.

4. ИМИТАЦИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Описанные в первой части работы элементы абстрагирования, идеализации и формализации позволили существенно снизить уровень сложности этапа имитационного моделирования.

Для его реализации на основе анализа навигационных карт конкретного аэродрома надо построить расширенное квантованное пространство воздушной зоны и задаться статистикой прилета и вылета ВС по различным трассам. Будем полагать далее все это известным.

Расширим далее количество ограничений, накладываемых на движение ВС. Будем полагать следующее.

1. Заходящие на посадку (взлетающие) ВС не могут увеличивать (уменьшать) свой высотный эшелон.

2. При смене конкретным ВС эшелона по высоте оказываются «занятыми» два находящиеся друг над другом состояния: h_i и h_{i-1} – для заходящего на посадку и h_i, h_{i+1} – для взлетающего, где h_i – эшелон, соответствующий началу маневра.

3. Случайными во встречных потоках ВС являются: трассы прилета и вылета, моменты смены высотного эшелона и эшелоны входа и выхода ВС в зону критических перекрытий.

4. Будем полагать для простоты, что аэродром имеет две независимые ВПП для взлета и посадки.

5. Будем полагать что к аэродромному пространству подходят четыре воздушных трассы.

6. Будем полагать ветровое поле фиксированным, не меняющимся во времени. Другими словами, направления взлета и посадки на ВПП не меняются и используется лишь одна структура взаимного расположения SID и STAR.

Последнее допущение связано с тем, что в зависимости от направления ветра может меняться и направление взлета/посадки на ВПП, а следовательно, и геометрия всей картины пересечения маршрутов ВС (матричное поле критических перекрытий). Для корректного учета влияния этого эффекта на статистические результаты имитационного эксперимента необходимо использование розы ветров аэродрома.

Имитационный эксперимент заключается в следующем. Случайным образом формируются два потока ВС, входящих в зону критических перекрытий. Для каждого ВС из этих потоков случайным образом выбираются (из допустимых значений): высотные эшелоны влета и вылета из зоны, трассы прибытия и убытия ВС (в модели их 4). Строятся случайные «траектории» подъема и спуска ВС. По матрице критических перекрытий $\hat{R}(\rho_1, \rho_2)$ с учетом выбранных ранее трасс прибытия и убытия восстанавливаются пары (ρ_1, ρ_2) – «координаты» точек конфликтов. С учетом соотношения $\xi + \rho_1 = \eta + L - \rho_2$, связывающего моменты влета ВС в анализируемую зону, устанавливается факт наличия или отсутствия конфликта между ними. При наличии конфликта одно из конфликтующих ВС (либо взлетающее, либо садящееся) случайным образом удаляется из потоков. Траектория оставшегося ВС проверяется далее на наличие критических перекрытий. Если в конечном итоге это ВС достигает противоположной границы зоны перекрытий, то в счетчик позитивных исходов записывается единица, в противном случае – нуль.

Эксперимент проводится N раз. Если показания счетчика – N_1 , то пропускная способность аэродрома на взлет/посадку или \tilde{J} – максимальная интенсивность встречных потоков ВС, бесконфликтно проходящих воздушное пространство аэродромной зоны, определяется по простой формуле

$$\tilde{J} = \left(\frac{N_1}{N} \right) \cdot \left(\frac{T}{\tau} \right),$$

где τ – период квантования (1), а T – единица измерения времени. Описанный имитационный эксперимент позволяет искусственно менять в модели q – количество точек критических перекрытий, анализируя зависимость пропускной способности аэродромной воздушной зоны от сложности топологии трасс – $\tilde{J} = \tilde{J}(q)$. На рис. 4 представлены результаты описанного эксперимента.



отражают топологию реальных воздушных трасс конкретного аэродрома.

Рис. 4. Зависимость коэффициента N_1/N от числа критических перекрытий в аэродромной воздушной зоне

Число критических перекрытий квантованных состояний в аэродромной воздушной зоне менялось в эксперименте с помощью вариации отдельных элементов матрицы \hat{R} . На рисунке приведены усредненные (по наборам исключаемых точек перекрытия) результаты. Следует отметить, что приведенные расчеты носят лишь иллюстративный характер, поскольку не

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассматривается задача об оценке пропускной способности воздушной аэродромной зоны, т.е. об оценке максимальной интенсивности потоков взлетающих и заходящих на посадку ВС, бесконфликтно проходящих воздушную зону. Решение задачи разбивается на два этапа. На первом этапе с использованием методов абстрагирования, идеализации и формализации строится «квантованная» модель воздушного пространства аэродромной зоны [4–6]. В представляемой работе проведено расширение этой модели, учитывающее наличие нескольких трасс прилета и вылета ВС для анализируемой зоны, что приводит к соответствующему усложнению топологической картины траекторий движения ВС.

Этот первый этап существенно упростил дальнейшее решение задачи – переход к имитационному моделированию, который позволил дать оценку для пропускной способности аэродромной воздушной зоны с учетом пересечений маршрутов прилета и вылета ВС. В статье приводятся результаты проведенного имитационного эксперимента, иллюстрирую-

щие зависимость пропускной способности зоны от количества критических перекрытий маршрутов ВС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приказ Министерства транспорта РФ от 24.02.2011 № 62. Об утверждении методики расчета технической возможности аэропортов и порядка применения методики расчета технической возможности аэропортов. – М.: РГ, 2011.
2. IATA Airport Development Reference Manual. 9th Edition. 2004.
3. **Дектярев О.В., Зубкова И.Ф.** Ускоренное моделирование процессов организации потоков и управления ВД. Аналитический обзор. – М.: НИЦ ГосНИИАС, 2008.
4. **Кузнецов В.Л., Чепурина А.А.** Об одной аналитической модели пропускной способности аэропорта // Научный вестник МГТУ ГА. – 2011. – № 169. – С. 94–98.
5. **Кузнецов В.Л., Филонов П.В.** Моделирование пропускной способности аэродрома с учетом конфликтных ситуаций в воздушном пространстве в формализме ферми-систем // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2012. – № 3. – С. 136–144.
6. **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. – С. 23–28.

COMBINED SIMULATION-ANALYTICAL MODEL OF AERODROME AIRSPACE CAPACITY

Kuznetsov V.L., Gorchakov A.I.

An approach to the problem of estimating an aerodrome airspace capacity based on the idea of airspace «quantization» and transition to discrete time while imposing restrictions on the filling of quantum states by aircrafts has been developed in this paper. It is shown that such a formalism can significantly reduce the complexity of aircrafts movement simulation in the airfield zone, to take into account the restrictions imposed on the aerodrome airspace capacity by intersections of arrival and departure routes. The paper presents the results of the simulation experiment, illustrating the dependence of the aerodrome airspace capacity upon the number of aircraft routes intersections, v.kuznetsov@mstuca.aero.

Key words: aerodrome airspace capacity, airspace quantization, simulation experiment.

REFERENCES

1. On approval of the methodology for calculating the technical capacity of the airport and the application of methods for calculating technical ability airports. Order of Transport Ministry of the Russian Federation of 24.02.2011 № 62. M.: RG. 2011. (In Russian).
2. IATA Airport Development Reference Manual. 9th Edition, 2004.
3. **Dektjarev O.V., Zubkova I.F.** Faster modeling of flow management and air traffic control. Analytical overview. – M.: NIC-GosNIIAS, 2008. (In Russian).
4. **Kuznetsov V.L., Chepurina A.A.** About one analitical model of the airport throughput. Scientific Herald of MSTUCA. 2011. No. 169. Pp. 94–98. (In Russian).
5. **Kuznetsov V.L., Filonov P.V.** Simulating Aerodrome Handling Capacity in Terms of Fermi Systems Given Airspace Conflicts. Journal of Computer and System Sciences International. 2012. Vol. 51. No. 3. Pp. 468–476.
6. **Kuznetsov V.L., Filonov P.V., Chepurina A.A.** The quantum states system constructing method in airport throughput computation model. Scientific Herald of MSTUCA. 2012. No. 184. Pp. 23–28. (In Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Валерий Леонидович, 1949 г.р., окончил МГУ им. М.В. Ломоносова (1972). Доктор технических наук, заведующий кафедрой прикладной математики МГТУ ГА, автор более 100 научных публикаций. Область научных интересов – методы математического моделирования в задачах распространения излучения в пространственно неоднородных случайных и периодических средах, УВД, безопасность полетов, электронный адрес: v.kuznetsov@mstuca.aero.

Горчаков Антон Игоревич, 1996 г.р., окончил МГТУ ГА (2015). Область научных интересов – УВД, имитационное моделирование.