

**СИНТЕЗ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ И СЛУЧАЙНЫХ ПОТОКОВ
ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ В СОСТАВЕ КОМПЛЕКСА ИМИТАЦИОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ОрВД*****В. П. Егорова, И. Ф. Зубкова, А. В. Кан, В. И. Кухтенко (Москва)**

Рассматриваются средства автоматизированного формирования и оперативной модификации детерминированных и случайных моделей исследовательских входных потоков воздушных судов (ВС) в воздушное пространство РФ (ВП РФ). Данные средства реализованы в рамках комплекса имитационного моделирования систем организации воздушного движения (КИМ ОрВД). В число задач КИМ ОрВД входит оценка эффективности системы ОрВД и использования воздушного пространства (ИВП) при изменении интенсивности воздушного движения (ВД), условий выполнения полетов, структуры и состояния ВП и системы ОрВД, а также задачи планирования трассовой структуры ВП и секторов управления, регулирования и управления потоками ВД. Эти задачи требуют многократного моделирования прохождения различных потоков ВД в заданном ВП, а следовательно, наличия в составе КИМ развитых средств автоматизированного синтеза различных потоков ВД, отвечающих требованиям каждой задачи [1, 2].

Данные по формируемым потокам могут основываться как на реальных, так и на прогнозных данных. Под реальным потоком ВД понимается поток, соответствующий реальным планам полетов либо фактически выполненным полетам в ВП РФ. Под исследовательским потоком ВД понимается поток, по своим характеристикам отвечающий заданию исследователя [3]. Он может быть детерминированным либо случайным. Под детерминированным потоком условно понимается поток, характеристики (план) каждого полета в котором заданы непосредственно исследователем (как выбором существующих, модификацией их, так и отдельным формированием). Под случайным понимается поток ВД, сформированный программно на основе выбранной исследователем стохастической модели с заданными количественными и качественными характеристиками ВД. Автоматизированное формирование и оперативная модификация детерминированных и случайных исследовательских потоков включает в себя операции:

- работа с библиотеками входных потоков ВД;
- формирование методических исследовательских потоков: «модельный план»;
- оперативное изменение текущих входных потоков ВД: «модификация плана»;
- формирование выборки потоков для заданной области ВП (зональный центр (ЗЦ); районный центр (РЦ); сектор УВД; заданное направление): «выборка потока для заданной области ВП»;
- автоматизированное формирование и оперативное редактирование случайных исследовательских выходных потоков, сформированных на базе репрезентативной выборки детерминированных суточных планов: «случайный поток».

Наличие таких возможностей по работе с потоками ВД обеспечивает гибкость подготовки исследовательского сценария: возможность быстрого формирования исследовательского сценария путем автоматизации и использования библиотек заранее подготовленных вариантов; автоматизация многовариантной подготовки данных по исследуемому потоку ВД; простая перестройка (переход) от одной исследовательской задачи к другой.

Работа с библиотеками входных потоков. Для возможности повторного и неоднократного моделирования задачи в близких условиях (например, одного и того же планового потока при различном состоянии ВП) реализуется возможность хранения и

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 07-08-12246).

повторного использования вариантов данных по потоку ВД. В библиотеке хранятся как плановые и фактические потоки, так и ранее сформированные или модифицированные исследователем. Хранение данных организовано в виде многоуровневого каталога для организации хранения данных как по детерминированным потокам, так и для «пакета» реализаций случайного потока. При работе с библиотекой полетных данных исследователю предоставляются возможности: выбор варианта суточного плана и его помещение в оперативные таблицы; сохранение сформированного исследователем потока и помещение его в библиотеку; удаление варианта из библиотечного списка.

Синтез детерминированных потоков. Формирование и модификация исследовательских потоков включает в себя следующие средства: «модельный план»; «модификация плана»; «выборка потока для заданной области ВП».

Синтез «модельного плана» осуществляется на основе использования исходного суточного плана путем выбора из него отдельных рейсов, их модификации и включения в модельный план. Синтез требуемого потока состоит из следующих шагов: выбор из исходного и включение в модельный план любого полета; сдвиг по времени плана любого полета модельного плана; если требуется, то «размножение» полетов по одному маршруту и создание потока летящих друг за другом и с заданным интервалом ВС.

Примером использования «Модельного плана» в КИМ ОрВД служит синтез потока для задачи обнаружения и разрешения конфликтных ситуаций. В частности, могут быть сформированы несколько отдельных потоков ВС, выполняющихся по пересекающимся трассам на одной высоте с заданным интервалом времени между каждой парой ВС. Применение алгоритмов обнаружения и разрешения конфликтов к таким потокам позволяет оценить характеристики и качество работы выбранных алгоритмов.

Средство «модификации плана» обеспечивает оперативное редактирование потоков ВС: изменение вылета выбранного рейса, изменение маршрута выбранного рейса, удаление рейса из списка рейсов. Примером использования «модификации плана» в КИМ ОрВД служит синтез потока для задачи выработки мер регулирования, в частности, выработки точечных мер регулирования потока: задержка в вылете выбранного полета; изменение маршрута выбранного полета; удаление выбранного полета из оперативных данных.

Синтез входного потока ВД для заданной области ВП осуществляется на базе заданного входного потока ВС в ВП РФ, обеспечивает формирование входных данных по «подпотоку» для выбранного сектора УВД РЦ, РЦ или ЗЦ в заданный исследователем час или по заданному направлению.

Примером использования «входного потока ВД для заданной области ВП» в КИМ ОрВД служит синтез потока (как исходных данных) для задач ремаршрутизации и секторизации для интересующего исследователя РЦ.

Синтез случайных потоков ВД. Примером использования этой функции служит синтез случайных потоков для проведения прогнозных исследований. В частности, могут быть сформированы потоки ВД с изменившейся интенсивностью полетов (увеличившейся) для оценки влияния их на пропускную способность ВП.

Рассмотрим общие требования, на основании которых происходит синтез случайных потоков. *Требуется:*

1. Формировать случайный входной поток ВС, по своим статистическим характеристикам соответствующий базовой выборке полетных данных либо отличающийся от нее по этим характеристикам в соответствии с заданием исследователя. В качестве такой выборки могут выступать реализации суточных полетных данных, соответствующих плану или факту и хранимых в библиотеках полетных данных КИМ ОрВД.

2. Формировать случайный поток на основе пуассоновской модели [4], учитывать нестационарность входного потока ВС в течение суток.

4. Реализовать возможность равномерного изменения на заданную величину интенсивности входного потока относительно базового. Реализовать возможность индивидуального задания и изменения интенсивностей входного потока на отдельных направлениях.

6. Предусмотреть возможность изменения степени (частоты) использования тех или иных типов ВС относительно базовой.

7. Учитывать случайный характер точки изменения эшелона на крейсерской фазе полета ВС путем «разыгрывания» положения точки смены эшелона в области точки смены эшелона в базовом полете.

8. При формировании случайных времен входа ВС контролировать и при необходимости корректировать временные интервалы так, чтобы в точке входа на эшелоне входа не нарушались нормы продольного эшелонирования (нормы «временного» эшелонирования). При этом интенсивность входного потока в точке в целом должна оставаться равной заданной интенсивности.

Приведенным выше функциональным требованиям к алгоритму формирования случайного входного потока ВС соответствует следующая постановка задачи.

Имеются:

1) Совокупность реализаций входных потоков ВС (иначе – заданный входной поток), являющихся источниками информации об интенсивности воздушного движения и позволяющих определить следующие характеристики: оценки интенсивности полного входного потока и интенсивностей потоков для каждой точки входа и для каждого часа суток; характеристики структуры воздушного движения в пределах исследуемого региона ВП (с делением на типы ВС, направления, четырехмерные планы). Одна реализация входного потока задана в виде суточного потока (совокупность полетов на сутки), а ее характеристики являются в общем случае переменными во времени и пространстве. Входной поток является многомерным и нестационарным. Составляющие вектора параметров интенсивностей входного потока являются в общем случае нестационарными и коррелированными между собой.

2) Параметры, задающие отличие характеристик формируемого входного потока ВС от исходного потока: основной коэффициент увеличения/уменьшения интенсивности входного потока; коэффициенты увеличения/уменьшения интенсивностей входного потока на заданных направлениях; коэффициенты изменения степени использования заданных типов ВС.

Необходимо: сформировать случайную реализацию входного потока ВС, отвечающую следующим условиям:

1) Полный входной поток, а также поток ВС в каждой точке входа описывается законом Пуассона [4].

2) Интенсивности случайного полного входного потока, а также потока в каждой точке входа должны соответствовать интенсивностям исходного потока с учетом заданных коэффициентов изменения.

3) Для каждой точки входа должно сохраняться соотношение между количеством полетов в различные конечные точки (точки выхода), соответствующее исходному потоку.

4) Для каждой линии (пары конечных точек маршрута) должно выполняться соотношение типов ВС, совершающих полеты по ней с учетом заданных коэффициентов изменения по заданным типам ВС.

5) Для каждой пары «линия–тип ВС» должно сохраняться соотношение между используемыми в заданном потоке маршрутами, соответствующее исходному потоку.

6) Для каждой тройки «линия–тип ВС–маршрут» должно сохраняться соотношение между вертикальными профилями полета, используемыми в заданном потоке.

7) Для каждой точки входа на каждом эшелоне должны соблюдаться заданные как параметр нормы «временного» эшелонирования. При этом для суммарного входного потока в этой точке должна сохраняться пуассоновская модель и заданные интенсивности.

Блок-схема алгоритма формирования одной реализации случайного потока приведена на рис. 1.

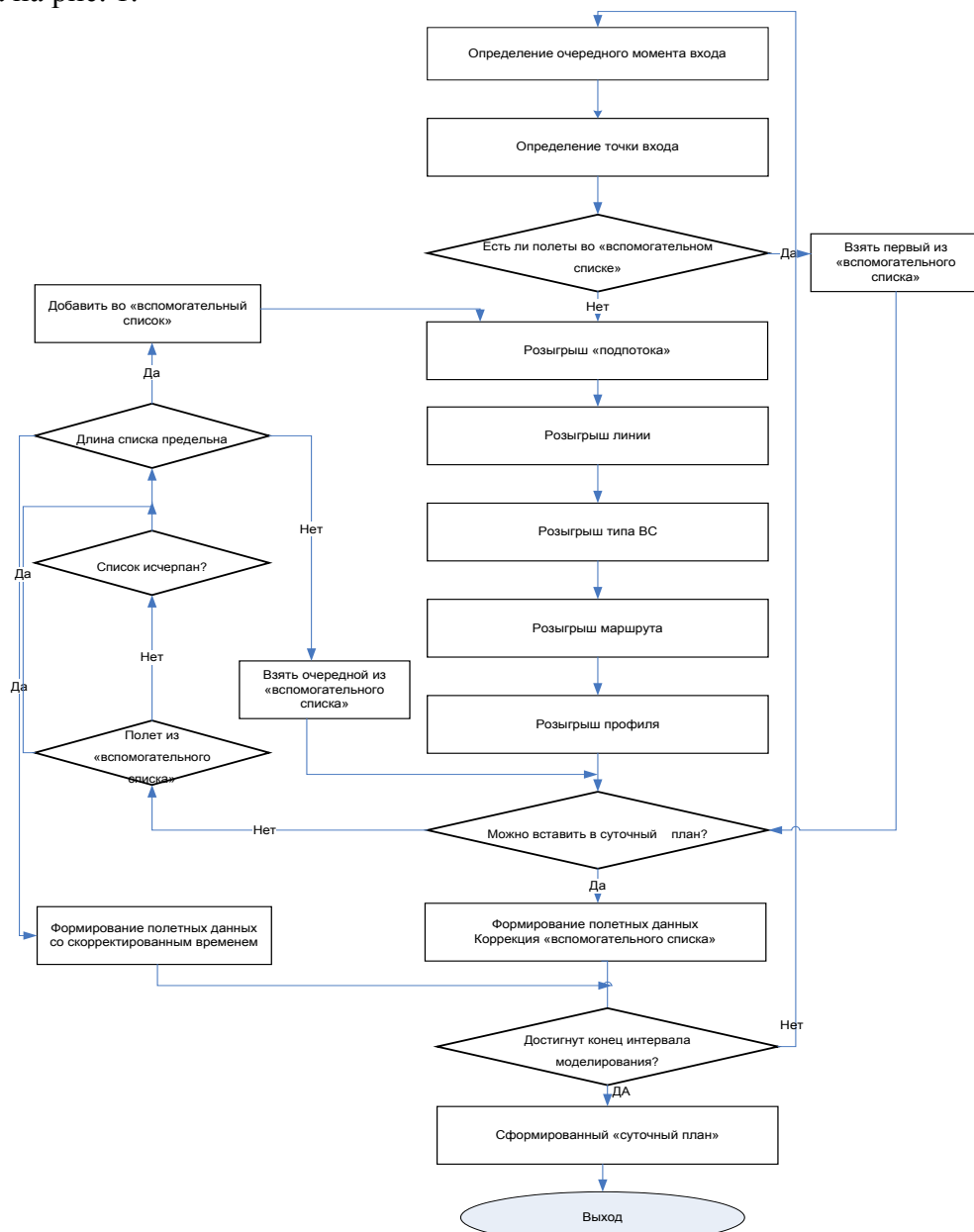


Рис. 1

Довольно сложная структура алгоритма, а также необходимость довольно громоздких вычислений вызваны следующими причинами: необходимостью гибкого задания интенсивности по подпотокам; необходимостью гибкого задания интенсивности по типам ВС; необходимостью выполнения требований по строгому выполнению требований по характеристикам потока в точках в условиях первых двух причин.

Пример синтеза случайного потока. Данный пример демонстрирует особенности и возможности КИМ по прогнозированию изменения интенсивности ВД в заданном регионе. В качестве такого региона выбран сектор ОВД УСХХ Запад, который принад-

лежит Ханты-Мансийскому РЦ. На рис. 2 приведены некоторые характеристики исходного выбранного потока ВД, загружающего сектор УСХХ Запад. В таблицах приведены почасовые интенсивности ВД: по линиям и точкам входа; по точкам входа и частотам использования типов ВС по линиям; по точкам входа и эшелонам. На диаграмме приведена почасовая интенсивность ВД (рис. 3).

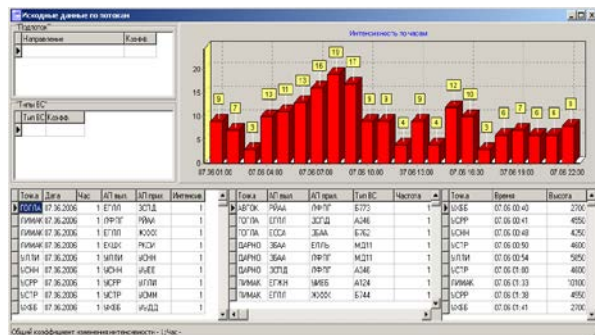


Рис. 2

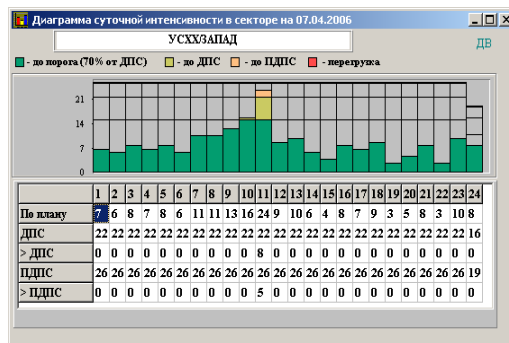


Рис. 3

Имеющаяся в настоящее время интенсивность ВД в секторах РЦ в целом приемлема с точки зрения обслуживания при существующей структуре ВП и ее соответствии нормативным пропускным способностям. Даже в наиболее загруженные сутки интенсивность ВД не превышает нормативы пропускных способностей (НПС), только кратковременно это не выполняется, однако и при этом превышения предельно допустимой ПС (ПДПС) не происходит. Для иллюстрации на рис. 4 приведена диаграмма интенсивности ВД в этом секторе в день наиболее интенсивного воздушного движения. Видно, что в 11 ч интенсивность ВД достигает своего максимального значения в течение суток (величина интенсивности равна 24 при НПС равном 22, ПДПС равном 26).

Пусть прогнозируется незначительное среднее увеличение ИВД в ВП района УСХХ (на 5%), за исключением направления «Москва (аэропорты: УУЕЕ, УУВВ, УУДД) – Сургут РЦ (аэропорты: УСХС, УСРО, УСНН, УСРР, УСРК)», где прогнозируется значительное её увеличение (на 50%). Требуется ответить на вопрос: останется ли допустимой загруженность диспетчера в этих условиях либо необходимо готовиться к мерам регулирования – изменению характеристик планового потока ВД (распределением по времени, ремаршрутизацией части потока) или проведению пересекторизации? Для ответа на этот вопрос сформируем набор случайных реализаций исследовательских случайных потоков ВД. Характеристики интенсивности потока ВД при этом будут соответствовать принятой гипотезе, а структурные и качественные характеристики потока (маршруты полета, высотные профили, типы ВС) сохраняются (см. рис. 4).

С использованием этих данных в рамках модели «Автоматизированное формирование и оперативная модификация детерминированных и случайных исследовательских входных потоков ВС в ВП РФ» был сформирован ансамбль реализаций прогнозируемого суточного потока ВД, загружающего район УСХХ. Анализ показал, что наиболее напряженная ситуация имеет место в пятой реализации. Общее число полетов в течение суток через сектор УСХХ Запад увеличилось с 201 до 261. Диаграмма интенсивности в этом секторе (рис. 5) показывает, что в 10 и 11 ч интенсивность движения увеличилась на 50 и более процентов. Это объясняется тем, что в этот период выполняется основная часть рейсов на направлении «Москва–Сургут». В эти два часа наблюдается превышение ИВД над ПДПС. Это определяет необходимость разработки предложений по мерам регулирования: перенесение потоков на более ранние либо более поздние часы (отличающиеся незначительной интенсивностью), ремаршрутизация потока в обход этого сектора или пересекторизация района УСХХ.

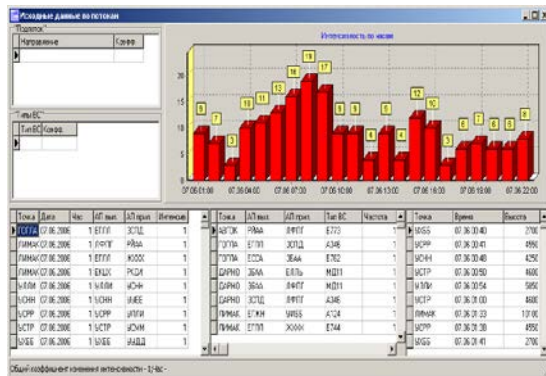


Рис. 4

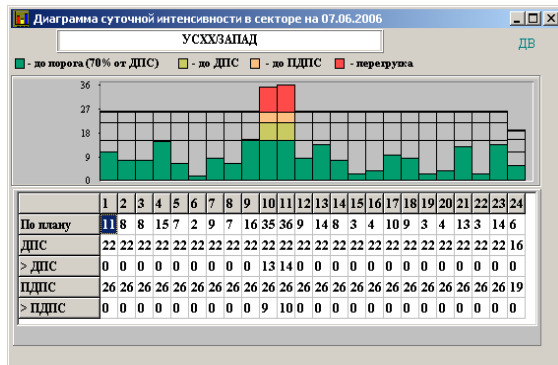


Рис. 5

Выводы. Реализованные в КИМ ОрВД принципы и особенности синтеза детерминированных и случайных потоков ВД позволяют применять их для решения разносторонних задач, связанных с анализом различных проблем использования воздушного пространства, отработкой алгоритмов управления потоками, проблемами обнаружения потенциальных конфликтных ситуаций; использовать их при прогнозных исследованиях. Использование таких моделей обеспечивает исследователя широкими возможностями по решению задач анализа и синтеза потоков ВД. Внедрение этих моделей позволяет расширить возможности КИМ ОрВД как средства, ориентированного на широкий круг пользователей – специалистов в области систем планирования и управления потоками ВД.

Литература

1. Дегтярев О. В., Егорова В. П., Зубкова И. Ф., Чутков В. А. Комплекс имитационного моделирования потоков воздушного движения//Труды ГосНИИАС. Вопросы авионики. 2003. Вып. 2(12)2.
2. Degtyaryev O. V., Egorova V. P., Zubkova I. F., Kan A. V., Chutkov V. A. Regulated Traffic Flow Simulation Tool (RATFST)//16th IFAC Symposium on Automatic control in aerospace, Preprints. Vol. 1. 2004. P. 308.
3. Дегтярев О. В., Егорова В. П., Зубкова И. Ф., Кан А. В. Особенности моделирования этапов планирования потоков воздушного движения с использованием КИМ УВД//«Имитационное моделирование. Теория и практика. ИММОД-2005». Т. II. 2005. С. 79.
4. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование. Классика CS. 3-е издание. СПб.: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2004. 847 с.