
ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА И СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ**О. В. Дегтярев, В. Н. Минаенко (Москва)****Введение**

Основная задача системы организации воздушного движения (ОрВД) – обеспечить баланс между потребностями авиакомпаний и других пользователей по использованию ими воздушного пространства (ВП) и пропускной способностью (ПС) системы. Превышение интенсивности воздушного движения (ИВД) над ПС приводит, в лучшем случае, к снижению показателей эффективности (дополнительный расход топлива) и регулярности (увеличение задержек), а в худшем – к снижению безопасности полетов. Поэтому как на этапах планирования воздушного движения (ВД), так и при его выполнении необходимо учитывать имеющиеся реальные возможности по ПС системы. А для этого требуется иметь средства для адекватной оценки текущей ПС.

Традиционно разрабатывались методики оценки ПС, основанные на определении зависимости (в виде номограмм или таблиц), связывающей ключевые и обобщенные характеристики ВД с допустимой ИВД в конкретном элементе ВП. Подготовка этих данных требовала большой (многолетней) предварительной работы. Однако точность и достоверность полученных оценок оставляла желать лучшего. Кроме того, получаемые в такой методике параметры ПС соответствуют только достаточно узкому классу систем управления ВД (УВД). При их серьезной модернизации требуется повторная работа по созданию новой методики.

Именно в такой ситуации находится в настоящее время отечественная система ОрВД. Например, методика оценки ПС секторов УВД 2003 года [1] основана на обработке прямых измерений уровня загруженности диспетчеров, проведенных на диспетчерских пунктах в различных условиях ВД и с учетом разных факторов, влияющих на сложность управления ВД. Путем осреднения и кусочно-линейной аппроксимации результатов измерений определены табличные зависимости ПС от основных характеристик сектора и потоков ВД. Достоинством методики является простота ее применения; однако достаточно грубая, осредненная, аппроксимация характеристик влияющих факторов не позволяет обеспечить требуемую в современных условиях точность оценки ПС. Параметры методики не соответствуют достигнутому уровню технических средств диспетчерских пунктов и бортового оборудования ВС. Кроме того, ПС зависит от внешних условий выполнения полетов, на ее величину также влияет конкретная, изменяющаяся во времени структура потоков ВД в обслуживаемом элементе системы ОрВД, что в существующих методиках учитывается слишком грубо.

В последние годы находят все большее распространение способы оценки ПС, основанные на имитационном моделировании ВД с адаптацией параметров модели к конкретным условиям УВД и последующей статистической обработкой результатов моделирования. Такой подход, например, широко применяется в Европе и США при оценке ПС сектора УВД [2–5]. Такой же подход впервые применительно к ВП РФ реализован в ФГУП «ГосНИИАС» в рамках программного комплекса имитационного моделирования КИМ ОрВД [6]. При этом разработана обобщенная методика оценки ПС трех ключевых с точки зрения системы ОрВД в целом типов элементов системы: секторов УВД, аэродромов, участков воздушных трасс (ВТ).

Определение пропускной способности. Особенности этого понятия для секторов управления, участков трасс, аэродромов

Традиционно наиболее важным элементом, требующим контроля соблюдения ПС, считается сектор УВД. В настоящее время все чаще критичным местом, где возни-

кают проблемы с ИВД и которые определяют ПС системы в целом, становятся район и взлетно-посадочные полосы (ВПП) аэродрома. Наконец, возможности выполнения эффективных полетов во многом определяются возможностями по загрузке участков ВТ.

Показатель, характеризующий ПС, должен быть наглядным и хорошо интерпретируемым, чтобы можно было легко контролировать его соблюдение. В практике ОрВД [2–5] ПС принято определять в различных параметрах. Наиболее распространенным является показатель ИВД. Проведенные нами исследования показали, что он действительно позволяет получить наиболее достоверные оценки ПС. Поэтому этот показатель используется в дальнейшем для всех трех типов элементов системы.

В обобщенном виде определение ПС элемента может быть сформулировано следующим образом. *ПС элемента системы ОрВД – это такая максимальная ИВД в этом элементе, при которой с заданной вероятностью могут быть выполнены все предъявленные ограничения по безопасности и эффективности.*

В настоящем докладе предлагается единый подход к построению методик оценки ПС указанных трех элементов системы ОрВД, заключающийся в определении ПС на множестве потоков ВД, которые возможны в течение оцениваемого периода времени. При этом, благодаря применению моделирования, ищется непосредственная связь между ключевыми характеристиками, определяющими ПС, и ИВД. В отличие от традиционных методик, рассматриваются не некоторые очень обобщенные параметры потоков ВД, а непосредственно потоки, задаваемые своими 4D маршрутами.

Разница в алгоритмах оценки ПС трех типов элементов системы ОрВД заключается:

- в ключевых характеристиках, в первую очередь определяющих и ограничивающих ПС;
- в особенностях структуры потоков ВД в ВП элементов конкретного типа;
- в составе дополнительных ограничений, учитываемых при оценке ПС.

За ПС сектора УВД принимается такая максимальная ИВД, при которой с заданной вероятностью временная загруженность диспетчеров не превышает нормативного значения. Следовательно, от модели требуется моделирование процессов пролета сектора с определением величин временной загруженности при обслуживании диспетчерами любого конкретного прогнозируемого потока ВД в условиях различного технического и кадрового оснащения диспетчерской позиции.

За ПС аэродрома принимается максимальная интенсивность взлетов/посадок, при которой не будут нарушаться нормы эшелонирования на подходе, на пороге ВПП, между ВПП, а необходимые для этого задержки не превышают заданного допустимого значения. Следовательно, требуется моделирование процессов прилета/вылета с определением достигаемых норм эшелонирования и требуемых для этого задержек. При этом способ моделируемого управления прилетом/вылетом может быть следующим: фактически используемым при оценке фактической ПС; оптимальным при оценке потенциальных возможностей по ПС.

За ПС участка ВТ принимается такая максимальная ИВД, при которой еще может быть осуществлен достаточно эффективный и безопасный полет. Считается, что это обеспечивается, если:

- вероятность разрешения на смену эшелона по запросу ВС не меньше заданной;
- при полете всех ВС с выгодной для них крейсерской скоростью вероятность нарушения продольных норм эшелонирования и необходимости предотвращения опасного сближения (с участием диспетчера или путем самоэшелонирования) не превышает заданного уровня.

Следовательно, требуется моделирование процессов выполнения полетов на участке ВТ, соответствующих возможным потокам ВС и выбранной стратегии управления ВД, с фиксацией случаев прогноза или реализации нарушения норм эшелонирования.

Таким образом, несмотря на некоторые особенности отдельных задач, можно предложить обобщенную схему оценивания ПС элементов системы ОрВД.

Общая схема оценки пропускной способности элемента ВП

Схема проведения оценочных исследований по обоснованию характеристик ПС элемента ВП, основанных на имитационном моделировании, представлена на рис. 1.



Рис. 1. Общая схема оценки пропускной способности элемента ВП

Предварительно готовятся данные по потокам ВД. Могут использоваться либо реальные (фактические) полетные данные, либо прогнозные данные, сформированные на основе принимаемой гипотезы (статистические потоки ВД). Объем данных должен быть достаточен, чтобы:

- «репрезентативно» (представительно) [7] описывать все возможные варианты реализации потока, прежде всего наиболее напряженные с точки зрения ПС;
- полученные статистические оценки имели достаточную доверительную вероятность.

Затем проводится собственно моделирование всех вариантов потоков ВД с одновременным вычислением необходимых для последующей оценки ПС характеристик выполнения полетов. При моделировании реализуется соответствующая схема выполнения управляемых потоков ВД. При оценке ПС сектора и участка ВТ предполагается, что полеты реализуют 4D маршруты в соответствии с принятыми исходными данными и фиксируются все события, требующие участия диспетчера. А вот при оценке ПС аэродрома в имитационной модели необходимо реализовать схему управления прибывающим и вылетающим потоками ВС с последующим моделированием и оценкой последствий такого управления (это связано с необходимостью оценки реализуемых задержек, характеризующих эффективность управления).

Все необходимые для последующей оценки ПС результаты моделирования архивируются и проходят статистическую обработку с оценкой максимального значения ИВД, при которой с заданной вероятностью обеспечится допустимая с точки зрения принятого критерия безопасности и эффективности ситуация, которая принимается за ПС.

Ключевые функции комплекса моделирования, необходимые для проведения оценки ПС

На каждом из указанных выше трех основных этапов оценки ПС используются три ключевые группы функций исследовательского комплекса моделирования:

- подготовка сценария (выбор исследуемого элемента системы, формирование исходных полетных данных и параметров, подготовка моделируемых характеристик и условий выполнения полетов);
- собственно имитационное моделирование. Может применяться как расчетное (математическое моделирование) с обработкой полетных данных, так и вариант моделирования процессов выполнения управляемых полетов (динамическое, дискретно-событийное);

• послеполетный анализ, обеспечивающий автоматизированное выполнение всех действий, соответствующих принятым алгоритмам обработки «экспериментальных данных» для получения оценок ПС.

Разработанный комплекс моделирования КИМ ОрВД [6] предназначен для прогнозных исследований и поддержки принятия стратегических решений по планированию и управлению ВД и ВП службами ОрВД РФ. По функциональным возможностям КИМ ОрВД не уступает зарубежным аналогам (RAMS, ТААМ, SAАМ [2]). Все операции в КИМ ОрВД выполняются с достаточным быстродействием в рамках взаимосвязанного программного обеспечения, использующего единые базы данных, расчетные и интерфейсные средства анализа, картографическое ядро. Для решения отдельных задач используются специализированные, ориентированные для конкретного применения алгоритмы и процедуры. Все эти возможности комплекса позволяют его использовать, в том числе, для оценки ПС элементов ВП [8].

Конкретизированная схема оценки для ПС сектора

Предлагаемая методика иллюстрируется на примере оценки ПС сектора УВД (рис. 2). Необходимо отметить следующие особенности проведения моделирования.

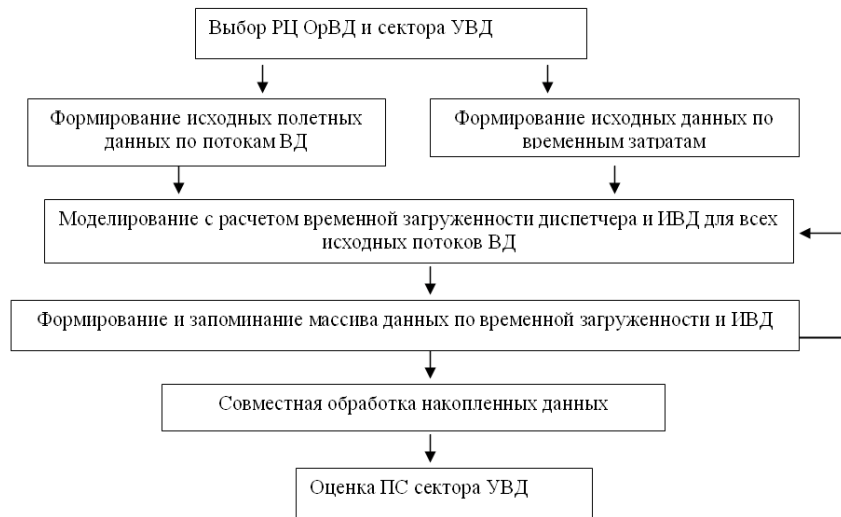


Рис. 2. Схема процесса оценки ПС сектора УВД

1. ПС оценивается путем предварительного расчета временной загрузки диспетчера (ВЗД) и ИВД для каждого часового потока ВД из исходного репрезентативного набора. В предлагаемой модели ВЗД с учетом 4D маршрута каждого ВС рассчитываются количество возникновения основных операций по управлению ВД, время выполнения этих операций и определяется суммарная ВЗД. Вычисления организуются в цикле по набору суточных потоков ВД. С учетом опыта отечественных и зарубежных методик [2–5], рассматриваются шесть основных групп операций диспетчера:

- принятие на сопровождение ВС, входящего в ВП сектора;
- сопровождение ВС на крейсерской фазе полета при его пролете ВП сектора;
- сопровождение ВС при смене высоты (на фазах подъема и снижения, а также при смене эшелона на фазе крейсерского полета);
- обнаружение и предупреждение потенциальных конфликтных ситуаций (ПКС);
- передача ВС, покидающего ВП сектора, другому диспетчеру;
- периодический анализ воздушной обстановки.

Каждая группа характеризуется величиной временных затрат (ЗТ) на однократное выполнение операций этой группы. Значения ЗТ задаются как адаптивные параметры модели, зависящие от условий работы диспетчера. Адаптация осуществляется

путем выбора исходных данных по ЗТ из предварительно сформированной библиотеки вариантов этих затрат. При этом учитываются две основные группы влияющих факторов. К первой группе относится техническая оснащенность диспетчерских пунктов: уровень обеспеченности средствами информации о характеристиках ВД (точность, частота обновления информации), средствами связи (голосовая/цифровая связь), средствами автоматизации анализа и визуализации воздушной обстановки, поддержки принятия решений. Ко второй группе относятся конкретные условия работы диспетчера: уровень обеспеченности ВС и соседних диспетчеров средствами связи, нормы эшелонирования, погодные условия, необходимость переговоров с бортом ВС на английском языке.

Предлагаемый метод адаптации параметров к конкретным условиям УВД, в отличие от традиционных методик [1], учитывает изменения условий не косвенным образом, а непосредственным учетом их влияния на время выполнения каждой отдельной операции диспетчера. Это позволяет повысить точность оценки ВЗД. При этом учитывается, что диспетчер работает с разными типами ВС в различных условиях. Например: часть ВС оборудована цифровой линией связи (CPDLC), а другие – только средствами голосовой связи; диспетчеры одних соседних районов имеют средства цифровой связи (OLDI), а другие нет. Учет этих обстоятельств обеспечивается заданием в библиотеке данных о всех возможных вариантах затрат и данных об относительной доле работы диспетчера в различных условиях.

2. По мере выполнения соответствующих расчетов формируется и запоминается массив почасовых данных по ВЗД и ИВД. Выполняется совместная обработка накопленных данных. Методом наименьших квадратов определяются характеристики корреляционной зависимости ВЗД и ИВД. Результатом совместной обработки являются графики среднего значения (МО) и среднеквадратического отклонения (СКО) временной загруженности в функции от ИВД (полиномы 2-го порядка).

3. За оценку ПС принимается такая максимальная ИВД, при которой $МО + \mu СКО$ временной загруженности не превышает нормативного значения, где μ – задаваемый параметр. При этом допускается, что в некоторых случаях нормативное значение будет превышено. Параметр μ выбирается в зависимости от допустимой частоты (вероятности) таких случаев и его величина является предметом дальнейших исследований. В данной работе принято значение $\mu = 1$ для обеспечения доверительной вероятности 0,9.

Пример оценки пропускной способности реального сектора

Рассмотрим в качестве примера оценку ПС сектора Киев-1 Московского центра ОрВД. Исходной полетной информацией является совокупность планов полетов за неделю наиболее интенсивного ВД в летний период (последняя неделя августа анализируемого года). В результате проведения указанного выше цикла моделирования для каждого из 168 часовых потоков ВД определены значения ИВД и соответствующей ВЗД. Распределение множества реализовавшихся точек и график МО временной загруженности в функции от ИВД показаны на рис. 3, а, где по оси абсцисс приведены значения ИВД, по оси ординат – ВЗД. Результаты представлены для временных затрат диспетчера на отдельные операции, соответствующих современному отечественному уровню технической оснащенности диспетчерских пунктов УВД и бортовой аппаратуры ВС (без использования цифровых линий передачи данных «борт – диспетчер» CPDLC и «диспетчер – диспетчер» OLDI). На рис. 3, б представлен график «трубки рассеивания» $МО \pm СКО$ (верхний и нижний графики, средний график – МО). Горизонтальными линиями на рис. 3 отмечены уровни относительной часовой ВЗД 0,55 и 0,78, соответствующие ее нормативным значениям при работе одного и двух диспетчеров (радиолокационного и процедурного контроля) на диспетчерской позиции.

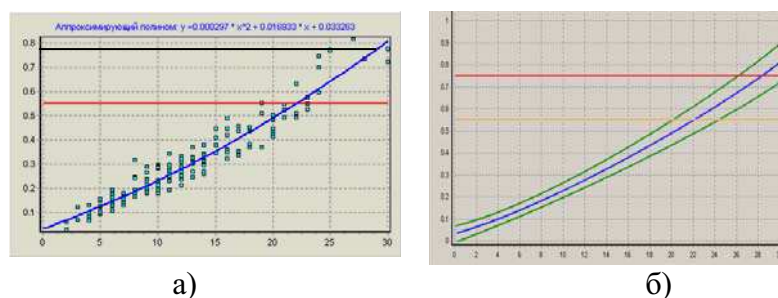


Рис. 3. Зависимость временной загрузки от ИВД (а) и график «трубки рассеивания» (б)

Значения ИВД при уровнях МО 0,55 и 0,78 равны 22 и 28 ВС/ч соответственно. Оценки ПС сектора (максимальные ИВД, не превышающие МО + СКО) равны 20 и 26 ВС/ч при работе одного и двух диспетчеров на диспетчерской позиции. Для сравнения: нормативная ПС сектора при двух диспетчерах на диспетчерской позиции, заявленная Московским районным центром, – 29 ВС/ч, т.е. близка к среднему значению приведенных оценок.

Выводы

Предлагаемый в докладе подход позволяет обеспечить участников планирования воздушного движения актуальными и достоверными оценками пропускной способности компонентов системы ОрВД. Разработанные методика и программные средства, основанные на применении имитационного моделирования, целесообразно использовать как при проведении прогнозных исследований, связанных с поиском эффективных решений по повышению пропускной способности системы, так и в текущей работе органов планирования использования воздушного пространства.

Литература

1. Методика оценки пропускной способности секторов РЦ УВД. Утверждена распоряжением Минтранса РФ от 7.05.2003 г. № НА-111-р.
2. Majumdera A., Ochienga W. Y., Benthamb J., Richard M. En-route sector capacity estimation methodologies: An international survey // Journal of Air Transport Management. 2005.
3. LINK2000 + Fast Time Simulation. To assess the Impact of DATA LINK on Sector Capacity. EUROCONTROL Headquarters, Brussels, 19 November 1999.
4. Presentation AIR TOP. Deutsche Flugsicherung (DFS), 2009.
5. Welch J. D., Andrews J. W., Martin B. D. Macroscopic workload model for estimating en route sector capacity. M.I.T. Lincoln Laboratory, Lexington, MA 02420-9185 Banavar Sridhar NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA 90435.
6. Дегтярев О. В., Егорова В. П. и др. Комплекс имитационного моделирования потоков воздушного движения // Сб. трудов ГосНИИАС. Сер. Вопросы авионики. 2003. Вып.2(12).
7. Дегтярев О. В., Кан А. В., Минаенко В. Н., Кашликова А. И. Методика формирования репрезентативных входных потоков воздушных судов для решения задач организации воздушного движения // Сб. трудов ГосНИИАС "Информационные технологии в разработках сложных систем". 2009. Вып. 1 (16).
8. Минаенко В. Н., Кан А. В. Разработка алгоритмов расчета нормативов пропускных способностей секторов обслуживания воздушного движения // IX Международная научн.-техн. конф. «Интеллектуальные системы» (ИНТЕЛС-2010), г. Владимир, 28 июня-2 июля 2010 г. Труды. М.: ВГУ имени А. Г. и Н. Г. Столетовых, 2010.