

---

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ИНТЕРЕСАХ ВАЛИДАЦИИ КОНЦЕПЦИЙ, ПРИНЦИПОВ И АЛГОРИТМОВ ОРГАНИЗАЦИИ ПОТОКОВ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ

Р.Х. Габейдулин, О.В. Дегтярев, И.Ф. Зубкова (Москва)

### Введение

Перед аэронавигационной системой РФ в рамках проводимой модернизации стоит задача внедрения средств регулирования потоков воздушного движения (ВД) на этапе текущего планирования и соответственно тактической организации потоков воздушного движения (ОПВД). Это определяет особую актуальность исследований по регулированию потоков ВД.

Система централизованного планирования (СЦП) для РФ, работающая в Главном центре единой системы организации воздушного движения РФ (ГЦ ЕС ОрВД РФ) [1-4], включает в себя только средства расчета использования воздушного пространства (ИВП), средства поддержки анализа ИВП диспетчерами планирования и предупреждения (рассылку сообщений-предупреждений) о прогнозируемом превышении пропускной способности.

В Европе и США регулирование потоков в трассовой части полета проводится изменением времени вылета воздушных судов из аэропортов. Для более точной организации потоков воздушного движения на вылете и прилете в некоторых аэродромах внедряют системы управления вылетом – Менеджер вылета (AMAN – Arrival Manager) и системы управления прилетом – Менеджер прилета (DMAN – Departure Manager).

В ФГУП «ГосНИИАС» в рамках работ по тематике управления воздушным движением создана модель системы СЦП, включающая блоки регулирования потоков ВД [5-7]. Разработанные алгоритмы регулирования основаны на принципах европейской системы планирования (Eurocontrol): централизованное планирование, меры регулирования – назначение слотов вылета, ставка на хорошую дисциплину пользователей воздушного пространства (ВП), общий принцип обслуживания в авиации «первым пришел – первым обслужен» [8-11]. Предложены новые алгоритмы, предполагающие вместо последнего традиционного принципа принцип «максимизации общей выгоды» даже за счет нарушения порядка обслуживания [4, 12].

Модель СЦП тестировалась и исследовалась в комплексе с моделью имитации полетов (автономная модель, комплекс имитационного моделирования), в том числе в полунатурном стенде моделирования КИС УВД [13-16].

К ограничениям разработанных алгоритмов ОПВД можно отнести следующее:

– при выработке слотов учитывалась только перегрузка секторов районных центров УВД; никак не учитывалась ситуация в аэропортах;

– назначение слотов основано на прогнозе ИВП на некоторый предстоящий интервал времени; этот прогноз, в свою очередь, формируется на основе планов полетов. Но даже при хорошем планировании предугадать четырехмерную траекторию движения воздушного судна с хорошей точностью нереально. Здесь играют роль и дисциплина выполнения полетов, и ветер, и влияние управляющих воздействий УВД (вызывающие эффект домино), и неожиданные явления (например, литерные рейсы). Поэтому нельзя исключать, что ситуация в результате выработанных мер регулирования станет еще хуже. Это требует проведения исследований и имитационного моделирования для оценки влияния учета неопределенности на эффективность мер регулирования. В современных зарубежных научных работах широко исследуются подобные вопросы [17-21]. Рассматриваются вопросы прогнозирования траекторий полетов воздушных судов (ВС), оценки будущей

загрузки секторов УВД с учетом неопределенностей, оптимизации процедуры назначения слотов вылета;

– слоты назначаются только для вылета ВС, для ВС в полете регулирование не формируется.

В продолжение работ по выработке новых концепций и технологий организации потоков предлагается объединить три процесса: планирование очереди ВС до вылета из аэропортов, планирование в полете, планирование очереди ВС на прилет в аэропорты.

Переход к предлагаемым принципам планирования и организации потоков ВД требует предоставления убедительных доказательств целесообразности, эффективности и выгодности нововведений. Поэтому необходимо проводить исследования, моделировать работу системы планирования. Для проведения валидации, оценки эффективности перспективных концепций регулирования потоков воздушного движения предложена имитационная модель процессов планирования ВД на тактическом этапе.

#### **Цель создания имитационной модели**

Оценка эффективности системы планирования потоков воздушного движения, включающей в себя систему централизованного планирования потоков воздушного движения в трассовой части и системы управления потоками вылета и прилета на АД, при различных условиях работы, в число которых входят:

- различный состав мер регулирования;
- различный состав учитываемых ограничений;
- различные стратегии реакции пользователей на меры регулирования;
- различные возможности по регулированию различных групп рейсов;
- различные точностные модели достоверности плановых данных (отличие относительно фактически реализуемых);
- различные способы управления (современная – без выдерживания плановых времен, либо перспективная концепция управления траекторией);
- различные характеристики потока ВД (интенсивность, узкие места, соотношение типов рейсов);
- различные условия выполнения полетов (погодные условия, пропускная способность элементов ВП);
- различные методы и алгоритмы решения оптимизационных задач регулирования;

#### **Основные системные требования к имитационной модели**

1) Имитационная модель должна обеспечивать моделирование процесса текущего планирования для заданного планового потока ВД, выполняемого в заданной аэронавигационной структуре, и в заданном состоянии этой структуры, а также в прочих заданных условиях выполнения планирования и выполнения полетов.

2) Модели должны обеспечить системный характер моделирования, позволяющий достаточно адекватно оценить влияние того или иного моделируемого фактора на эффективность регулирования потоков ВД.

3) Допускается использовать упрощенные статистические модели (например, модели отклонений выполнения плана, модели реакций пользователя на регулирование, модели отмены рейсов, модели выработки разрешения на взлет ВС).

#### **Структура динамической модели**

Укрупненная динамическая модель текущего планирования представлена на рис. 1 и включает следующие основные динамические блоки (модели):

1. Модель пользователей ВП, т.е. авиакомпаний (далее называется моделью центра управления полетов (ЦУП) авиакомпаний), обеспечивающая имитацию следующих процессов:

---

- появления новых заявок, отмены заявок, изменения плана полета в заявке;
- согласования мер регулирования, включая изменение заявленных планов по результатам согласования.

2. Модель работы органов и служб ОПВД по регулированию потоков ВД (модель централизованного планирования), включающая две подсистемы – две модели:

2.1. Модель обработки плановых и полетных данных – система обработки планов полета (СОПП). Эта модель должна обеспечивать имитацию получения, обработки и хранения плановых и фактических полетных (в том числе и маршрутных) данных и их изменений с тем, чтобы в любой момент эти хранимые данные соответствовали текущему состоянию с планированием и выполнением планов полетов.

Модель обеспечивает следующие возможности:

- прием заявок от модели ЦУП авиакомпаний с планами полета;
- прием информации от модуля согласования мер регулирования модели централизованного планирования;
- прием данных о взлетах от модели движения ВС (от систем наблюдения, которые в данном случае не моделируются);
- прием данных о пролете точек маршрута (данные о фактических временах пролета точек маршрута) от модели движения ВС (от систем наблюдения, которые в данном случае не моделируются).

2.2. Модель регулирования потоков ВД в трассовой части является центральной моделью, которая имитирует следующие два процесса регулирования:

- выработка предложений по регулированию (например, путем решения задачи оптимизации);
- инициализация и участие в процессе согласования мер регулирования.

3. Модель управления прилетом потока ВС на аэродром. Модель имитирует следующие процессы:

- процесс планирования прилета воздушных судов на аэродром;
- контроль за ситуацией по прилету и выявление нарушений норм продольного эшелонирования на пороге взлетно-посадочной полосы и в аэродромном пространстве;
- выработка оптимальных мер регулирования очереди потока ВС.

4. Модель управления вылетом потока из аэродрома. Модель имитирует следующие функции:

- процесс планирования вылета ВС из аэродрома;
- контроль за ситуацией по вылету и выявление нарушений норм продольного эшелонирования на пороге взлетно-посадочной полосы и в аэродромном пространстве;
- выработка оптимальных мер регулирования очереди потока ВС.

5. Модель выполнения полетов. Применяется дискретно-событийное моделирование. События для модели выполнения полетов – вылет, пролет точки конца маршрута вылета (SID), выход на воздушную трассу, вход ВС в сектор, подлет к аэродрому, сход с трассы, пролет точки начала маршрута прилета (STAR), посадка. Время очередного события случайно разыгрывается для каждого ВС в соответствии с принятой статистической моделью. В модели предусматривается отправка сообщений о взлете, пролете точек маршрута и посадке в модель централизованного планирования.

### **Моделирование процесса регулирования потоков ВД**

Моделирование процесса регулирования потока ВД представляет собой динамический процесс на заданном интервале времени. Периодически, с некоторым тактом, в рамках модели централизованного планирования решается основная оптимизационная задача регулирования. Рассчитывается загрузка всех контролируемых элементов. В стохастиче-

ской постановке под загрузкой понимается матожидание числа ВС, входящих в заданную область ВП в единицу времени. Необходимо учесть достоверность (возможные разбросы, плотность распределения) времен входа, которые зависят от величины оставшегося ожидаемого времени до входа. По этим данным судят о наличии перегрузки – превышении загрузки над пропускной способностью.

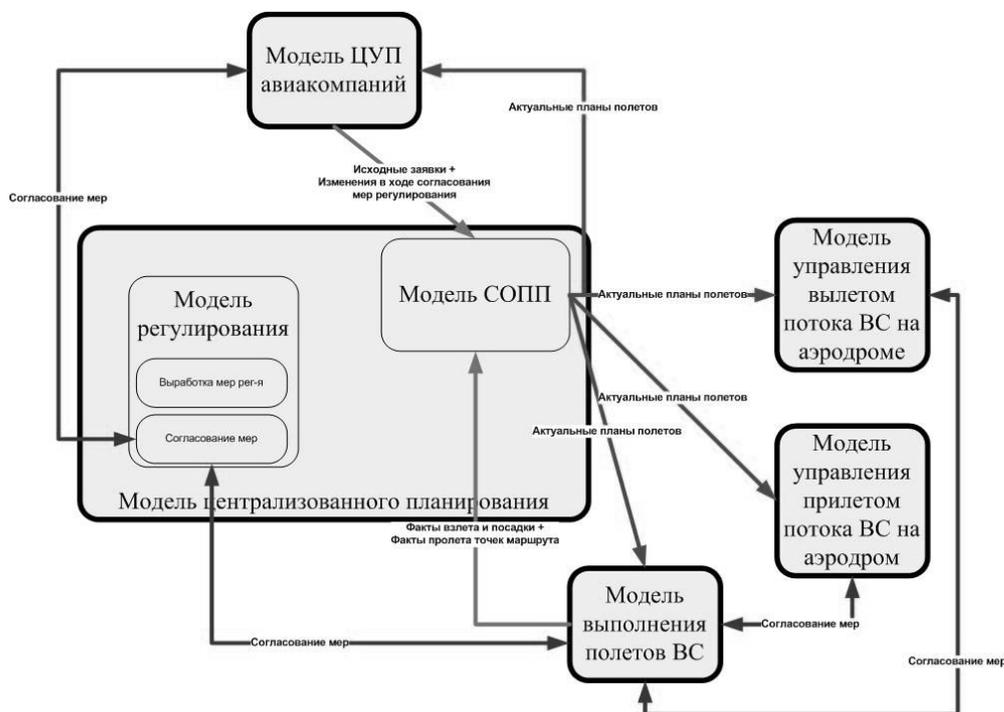


Рис. 1. Схема имитационной модели

Регулирование производится слотами вылета, а также слотами входа ВС в сектора по маршруту. Применяется статистический подход при выборе мер регулирования. Назначаются только те меры, положительный результат от которых хорошо прогнозируется. Назначением слотов вылета решается только часть проблемы, задача решать ее полностью не ставится ввиду неэффективности. Остальные проблемы решаются применением мер регулирования уже в полете: ситуация стала прогнозируемой – мера применяется; не стала – решение откладывается на более поздний срок (в наихудшем случае возлагается на диспетчера УВД).

Под регулирование слотами вылета попадают ВС, вылетающие из российских аэропортов, до вылета которых на момент запуска процедуры больше 20 минут, под регулирование слотами входа в сектор – производящие полет и до посадки которых больше 40 минут. Времена 20 минут и 40 минут – это стандартные горизонты планирования, применяемые в европейских системах управления очередью вылета и прилета соответственно. В рамках исследования могут быть установлены другие значения. В эти промежутки времени ВС могут попасть под регулирование, осуществляемое моделями управления прилетом и вылетом. Модель управления вылетом потока ВС уточняет слот, назначенный моделью централизованного планирования, исходя из реальной складывающейся обстановки в аэропорту, проверяет нормы продольного эшелонирования с вылетающими и прилетающими ВС на пороге ВПП и в аэродромном пространстве и назначает при необходимости новый слот. Модель управления прилетом потока ВС (за 40 минут до прилета) аналогично модели управления вылетом уточняет слот, назначенный моделью централизованного планирования, проверяет нормы продольного эшелонирования и при наличии нарушений назначает новые слоты пролета точек аэродромного пространства и прилета на ВПП. Ал-

горитмы регулирования и реализующие их процедуры для модели централизованного планирования и моделей управления вылетом и прилетом отличаются, соответствуют разным методам, подходам, концепциям. Однако:

– используемая алгоритмами информация одна и та же. Это текущий план полетов и соответствующая ему загрузка секторов и аэродромов, нормы продольного эшелонирования при прилете и вылете из аэропорта, состояние отдельных рейсов (вылетел, выполнил посадку, в полете, регулировался/не регулировался);

– на выходе также унифицированная информация: предлагаемый план регулирования (время вылета, пролета точек конца SID, точек выхода на трассу, время схода с трассы при заходе на посадку, время пролета начала STAR и время посадки на ВПП, изменение маршрутов прилета и вылета).

На основе выработанных предложений по регулированию инициируются (в модели централизованного планирования и в моделях управления вылетом и прилетом) процессы согласования мер регулирования. Отсылаются сообщения-предложения пользователям (в модель ЦУП авиакомпаний, воздушным судам). Модели ЦУП авиакомпаний формируют с помощью вероятностного подхода реакции на меры регулирования и отсылают сообщения, касающиеся регулирования (согласие, отклонение, изменение и др.)

Также периодически, с тем же тактом, модель централизованного планирования просматривает пришедшие от модели ЦУП авиакомпаний сообщения, касающиеся регулирования (согласие, отклонение, изменение и др.) и реагирует на них. Результаты реакции направляются в виде сообщений в модель ЦУП авиакомпаний, а также в модуль поддержания плановых данных в актуальном состоянии. Благодаря этому обеспечивается все время общий и актуальный, «отрегулированный» план полетов, в соответствии с которым модель управления вылетом из аэропорта выпускает ВС на вылет, а модели ВС совершают дальнейший полет в аэродромы назначения.

В модели управления вылетом в соответствии с актуальным планом назначается время взлета. В идеальном случае оно может точно совпадать с последним плановым. Но поскольку невыдерживание планового (назначенного) времени взлета является на практике одним из возмущающих факторов, эти погрешности также имитируются.

Дальнейший полет ВС имитируется в соответствии с его текущим планом. Ключевой характеристикой точности принимается погрешность выдерживания времен входа в сектора по маршруту.

Для моделирования процессов применяется дискретно-событийный подход. Организацию очереди событий обеспечивает диспетчер задачи. Процедуры регулирования влияют на очередь событий.

### **Выводы**

1. Предложена имитационная модель процесса текущего планирования воздушного движения

2. Предложена новая сквозная схема планирования и регулирования потоков ВД, включающая в себя регулирование на трассовой части, управление очередью вылета и прилета. Предложен новый метод регулирования потоков в трассовой части, учитывающий неопределенность прогноза траекторий.

3. При помощи спроектированной и разработанной модели предполагается:

– провести цикл исследований влияния на эффективность централизованного, глобального регулирования слотами, воздействия различных возмущающих факторов, границ применимости такого подхода к регулированию, влияние учета неопределенности на эффективность мер регулирования, особенностей регулирования применительно к ВП РФ;

– провести анализ возможностей и эффективности регулирования слотами вылета мето-

дом, лежащим в основе процедуры CASA в CFMU Евроконтроля, для воздушного пространства Российской Федерации с учетом воздействия различных возмущающих факторов. Сделать выводы, эффективно ли это для Российской Федерации, если нет, то при каких условиях это может быть эффективно.

– провести цикл исследований по оценке предложенной сквозной схемы планирования, выявлению области применимости.

### Литература

1. **Габейдулин Р.Х., Горячев Д.И., Зубкова И.Ф.** Алгоритмическое и программное обеспечение автоматизированной системы планирования использования воздушного пространства в ГЦ ЕС ОрВД // Научный Вестник МГТУ ГА. Серия Прикладная математика. Информатика. – 2010. – № 159.
2. **Габейдулин Р.Х., Горячев Д.И., Зубкова И.Ф., Мучинский А.В.** Реализация дистанционной функции анализа данных по использованию воздушного пространства // Научный Вестник МГТУ ГА. Серия Прикладная математика. Информатика. – 2012. – № 184. – С. 100–107.
3. **Горячев Д.И., Зубкова И.Ф., Линов В.В.** Опыт и особенности эксплуатации программного обеспечения автоматизированной системы планирования воздушного движения в ГЦ ЕС ОрВД // Сб. тр. Российского научно-технического семинара «Состояние и перспективы развития автоматизированных систем планирования использования воздушного пространства в РФ» (ПИВП – 2011). Москва, ФГУП «ГосНИИАС», 22 ноября – 24 ноября 2011 г. НИЦ ГосНИИАС. – М., 2011.
4. Материалы в Технический проект на создание и поставку комплекса средств автоматизации планирования использования воздушного пространства ГЦ-1 первой очереди. Подсистема организации потоков воздушного движения (ОПВД). Книги 1–4. Отв. исполнители Дегтярев О.В., Зубкова И.Ф. и др. М.: НИЦ ФГУП ГосНИИАС, 2009.
5. **Дегтярев О.В.** и др. Интеллектуальная поддержка решения задачи выработки мер по организации потоков воздушного движения. Тр. ГосНИИАС «Информационные технологии в разработках сложных систем», вып. 1(9), 2002.
6. **Дегтярев О.В.** и др. Анализ организационных и алгоритмических проблем управления и корректирования потоков в системе УВД РФ, ГосНИИАС, научно-технический отчет № 104(14839). – 2001, 2001.
7. **Кан А.В.** Разработка алгоритмов выработки мер регулирования потоков воздушного движения // ТИСУ. – 2010. – № 3.
8. **Graham Tanner.** The Principles of Flight Planning and ATM Messaging // European Air Traffic Management. Principles, Practice and Research. Ed. By Andrew Cook, University of Westminster, UK, Ashgate, 2007.
9. Air traffic flow&capacity management operations. ATFCN users manual. Eurocontrol, 2009.
10. General&CFMU Systems, edition 13. Eurocontrol, 2009.
11. ATFCM operating procedures for FMP, edition 3.0. Eurocontrol, 2009.
12. **Зубкова И.Ф., Габейдулин Р.Х., Котова А.О.** Алгоритмы расчета слотов вылета в процессе регулирования потоков ВД // сб. тр. Российского научно-технического семинара «Состояние и перспективы развития автоматизированных систем планирования использования воздушного пространства в РФ» (ПИВП – 2011). Москва, ФГУП «ГосНИИАС», 22 ноября – 24 ноября 2011 г. НИЦ ГосНИИАС. – М., 2011.
13. **Дегтярев О.В., Зубкова И.Ф., Габейдулин Р.Х.** Имитационная модель процесса регулирования потока ВД назначением слотов вылета // Сб. тр. Российского научно-технического семинара «Состояние и перспективы развития автоматизированных систем

---

планирования использования воздушного пространства в РФ» (ПИВП – 2011). Москва, ФГУП «ГосНИИАС», 22 ноября – 24 ноября 2011 г. НИЦ ГосНИИАС. – М., 2011.

14. **Дегтярев О.В., Егорова В.П., Зубкова И.Ф.** и др. Комплекс имитационного моделирования УВД // НТК «Авиационные системы в XXI веке». Т.2. – М.: ГосНИИАС, 2006.

15. **Вишнякова Л.В., Дегтярев О.В., Егорова В.П.** и др. Комплекс имитационного моделирования системы ОрВД РФ // Российско-европейский семинар «Концепции и технологии ОрВД». – М.: ЦАГИ, 2007.

16. Описание комплексного исследовательского стенда полунатурного имитационного моделирования интегрированных систем управления воздушным движением (КИС УВД). ГосНИИАС, научно-технический отчет №. 2100.100.0564-001/0800. – М., 2012.

17. **Hadjaz A., Marceau G., Saveant P. and Schoenauer M.** Increasing Air Traffic: What is the Problem?, Second SESAR Innovation Days, DLR and TUB, Braunschweig, November, 2012.

18. **Jonge H. and Seljée R.** Optimisation and Prioritisation of Flows of Air Traffic through an ATM Network, Second SESAR Innovation Days, DLR and TUB, Braunschweig, November, 2012.

19. **Gilbo E. and Smith S.** New Method for Probabilistic Traffic Demand Predictions for En Route Sectors Based on Uncertain Predictions of Individual Flight Events, Second SESAR Innovation Days, DLR and TUB, Braunschweig, November, 2012.

20. **Enac N. and Allignol C.** Combining Flight Level Allocation with Ground Holding to Optimize 4D-Deconfliction, Second SESAR Innovation Days, DLR and TUB, Braunschweig, November 2012.

21. **Agust A. ´ın, Alonso-Ayuso A., Escudero L. F., and Pizarro C.,** Mathematical Optimization Models for Air Traffic Flow Management: A Review, Studia Informatica Universalis, vol. 8, no. 2, pp. 141–184, 2010.