

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕРОПРИЯТИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ СТРУКТУРЫ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА РФ МЕТОДАМИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ\*

О. В. Дегтярев, Д. В. Жабин, Е. В. Филенкова, В. И. Кухтенко (Москва)

Настоящий период времени характеризуется постоянным увеличением интенсивности воздушного движения (на 10 и более процентов в год). Во многих регионах мира резервы по пропускной способности существующей системы организации воздушного движения (ОрВД) исчерпаны. С другой стороны, даже в условиях повышения общей интенсивности ВД необходимо одновременное повышение безопасности полетов, экономической эффективности, регулярности полетов. Дополнительные трудности обусловлены проходящей в нашей стране существенной модернизацией системы, внедрением принципиально новых технических средств и концепции CNS/ATM. Указанные причины определяют необходимость совершенствования, в том числе, и трассовой структуры воздушного пространства.

Рассмотрим задачу выработки рекомендаций по совершенствованию структуры воздушного пространства (ВП) РФ и применения в этих целях средств имитационного моделирования. Совершенствование связано с изменением трассовой структуры ВП, прежде всего с организацией новых точек и участков воздушных трасс (ВТ), прокладкой новых ВТ в целом. В качестве инструмента проектирования, поддерживающего решение этих задач, используем комплекс имитационного моделирования системы организации воздушного движения (КИМ ОрВД), разработанный в ГосНИИАС [1, 2]. Описание комплекса моделирования в целом, а также решаемых с его помощью задач было представлено на предыдущей конференции ИММОД-2005 [3]. Комплекс разработан для исследования эффективности использования воздушного пространства (ИВП) и опережающего анализа технических и организационных решений, принимаемых при внедрении перспективных концепций по ОрВД, а также влияния разрабатываемых альтернативных вариантов построения ключевых подсистем управления воздушным движением (ВД) на его эффективность. КИМ ОрВД поддерживает в автоматическом или автоматизированном режиме выработку вариантов по тому или иному совершенствованию системы и обеспечивает анализ, в том числе сравнительный, эффективности каждого варианта. Необходимо отметить, что имитационное математическое моделирование является единственным инструментом, с помощью которого можно решать такие задачи.

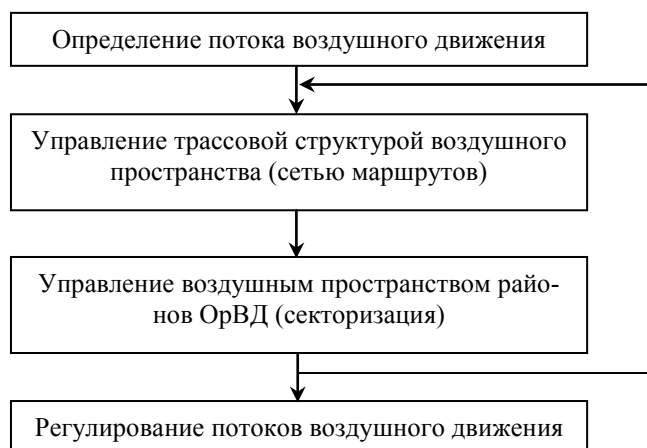
В соответствии со сложившимися взглядами на планирование ВД и ВП [4] к числу важнейших проблем, решаемых в интересах обеспечения соответствия пропускной способности системы потребностям, относятся следующие три задачи: совершенствование структуры ВП и структуры системы маршрутов; совершенствование структуры районов ОрВД (секторизация ВП района); совершенствование мер регулирования потоков ВД.

Процедуры синтеза ВП и управления потоками ВД, реализованные в рамках функций организации воздушного пространства и организации потоков ВД, взаимосвязаны и в идеале должны решаться совместно. Однако это приводит к столь сложным алгоритмическим и организационным проблемам, что принято решение [4] реализовывать операции по обеспечению соответствия состояния ВП и системы ОрВД потребностям ВД на основе «нисходящего принципа» (рис. 1).

Реализация этого принципа обеспечивает вмешательство системы ОрВД, приводящее к изменению предпочтительных пользователю ВП условий выполнения его поле-

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

тов, только в крайних случаях, когда управление ВП не обеспечивает соответствие его пропускной способности потребностям в его использовании. В первую очередь проводится управление трассовой структурой. С учетом взаимовлияния управление трассовой структурой и секторной структурой районов может происходить итерационно.



**Рис. 1. Схема обеспечения соответствия системы ОрВД потребностям в ВД**

Таким образом, в качестве мер обеспечения соответствия пропускной способности потребностям могут рассматриваться три группы мероприятий:

1. Мероприятия по совершенствованию структуры воздушного пространства РФ, прежде всего его трассовой части;
2. Мероприятия по совершенствованию структуры системы ОрВД, прежде всего районов ОрВД;
3. Меры по регулированию потоков ВД (ремаршрутизация, назначение слотов вылета и их комбинация).

Рассмотрим вопросы, связанные с первой группой мероприятий, при этом ограничимся решением одной частной проблемы – обеспечением соответствия пропускной способности ВП потребностям (интенсивности ВД) путем изменения трассовой структуры. В несколько упрощенном и сокращенном виде техническая постановка задачи прокладки новых трасс может быть сформулирована следующим образом.

Выявлена имеющаяся или прогнозируемая в определенном регионе проблема, связанная с превышением интенсивности воздушного движения над пропускной способностью. Это может быть связано с ограничениями пропускной способности диспетчеров отдельных секторов районов ОрВД либо с недопустимой интенсивностью ВД на отдельных трассах этого региона, приводящей к нарушению норм эшелонирования. Возможности по переориентации потоков ВД на другие трассы исчерпаны и не обеспечивают решение задачи без существенного снижения эффективности ее выполнения. Необходимо проложить новые (дублирующие) трассы или части трасс, которые обеспечат как ликвидацию проблем с пропускной способностью, так и высокую эффективность выполнения полетов с точки зрения пользователя. При этом геометрия новой трассы или новых трасс должна соответствовать определенным принятым правилам для трассовой структуры.

**Схема выработки предлагаемых вариантов совершенствования структуры ВП.** Примерная последовательность действий, выполняемых в процессе выработки вариантов по совершенствованию трассовой структуры, заключается в следующем.

1. Выявление узких мест, требующих прокладки новых воздушных трасс (ВД). При этом необходимо провести анализ существующих или прогнозируемых потоков ВД и выявить места (сектора управления районов и районы ОрВД в целом), где проис-

ходят или могут происходить превышения интенсивности ВД нормативов пропускной способности (НПС), а также установить те потоки ВД, которые рационально реландутизировать для снятия проблемы.

Для проведения таких исследований в составе КИМ необходимы средства, реализующие возможность формирования и использования данных по любым возможным потокам ВД, а также средства анализа ИВП в точках и на участках ВТ, в секторах управления и соответствия интенсивности ВД в них существующим нормативам пропускной способности.

2. Исследование возможностей преодоления проблем с пропускной способностью в рамках существующей трассовой структуры (т. е. выявление необходимости ее изменения). Возможности существующей трассовой структуры считаются исчерпанными, если решение проблемы с пропускной способностью «узкого места» требует недопустимого снижения эффективности выполняемых пользователем полетов (например, недопустимого увеличения протяженности маршрутов или времени полета ввиду редкой сети трасс) или приводит к возникновению новых «узких мест».

Для проведения таких исследований в составе КИМ, помимо указанных выше средств, должны быть средства, обеспечивающие «исследовательскую реландутизацию» выбранных подпотоков ВД и анализа результатов, в том числе эффективности проведенной реландутизации.

3. Если выявлена необходимость прокладки новых трасс, то следующим шагом является выработка вариантов изменения трассовой структуры («прокладка» новых точек и участков ВТ и включение их в состав вновь формируемых трасс). Для этого необходимы средства автоматизированной или автоматической прокладки трасс, обеспечивающие задание геометрических, временных и других параметров этих элементов ВП и организацию хранения этих данных.

4. Оценка эффективности и целесообразности того или иного варианта изменения трассовой структуры. Сюда входят действия по переориентированию части потока ВД для эффективного использования ВП и последующая оценка эффективности этих мероприятий, а также оценка достигнутых вариантов ИВП. Следовательно, для выполнения этих действий необходимы средства, обеспечивающие моделирование процесса переориентации (реландутизации) потока ВД, а также средства анализа ее эффективности и оценки достаточности этих мер.

5. Сравнительный анализ различных вариантов изменения трассовой структуры и выработка окончательных рекомендаций – предложений по организации новых трасс. Для этого, помимо перечисленных выше, в состав КИМ должны быть включены автоматизированные средства обработки и формирования отчетов, иллюстративных материалов и других документов.

Для решения рассмотренной задачи необходим следующий **состав средств моделирования**.

1. Средства формирования или выбора из числа заранее подготовленных вариантов исследуемого потока ВД и анализа состояния ВП, загружаемого этим потоком.

2. Средства анализа состояния ВП РФ, соответствующего заданному потоку ВД, заданной структуре ВП и заданному состоянию системы.

3. Средства прокладки новых точек, участков и воздушных трасс в целом, предназначенные для автоматизированного введения новых элементов структуры ВП.

4. Средства расчета НПС секторов ОрВД, соответствующих измененной трассовой структуре ВП района.

5. Средства реландутизации потока ВД, рассматриваемые как ключевой инструмент для формирования измененных потоков ВД при изменении трассовой структуры ВП.

6. Вспомогательные средства, обеспечивающие исследователей удобным интерфейсом, справочными возможностями, возможностями документирования и архивирования.

Все перечисленные средства, обеспечивающие непрерывный цикл моделирования с целью выработки рекомендаций об изменении структуры ВП, реализованы в КИМ ОрВД.

**Особенности реализации отдельных средств моделирования.** Анализ показывает, что ключевой подсистемой КИМ при исследованиях в интересах обоснования мер по изменению структуры ВП является средство «Ремаршрутизация потока ВД» в его составе. Реализованные в составе КИМ ОрВД автоматизированные программные средства собственно ремаршрутизации (модель ремаршрутизации) обеспечивают поддержку следующих операций:

- автоматизированный предварительный выбор совокупности (потока) полетов, принимающих участие в возникновении выявленной проблемы, по которым принимается решение по ремаршрутизации;
- автоматическая выработка предложений (вариантов) по изменению планов всех полетов (ремаршрутизации), входящих в этот поток, так, чтобы каждый полет не нарушал заданные ограничения и изменения четырехмерных маршрутов были по возможности минимальны;
- проведение сравнительного анализа эффективности и особенностей использования ВП до и после ремаршрутизации.

Ядром этой модели является процедура построения оптимального трассового полета в заданных условиях, по заданному критерию, с учетом заданных ограничений. Предлагаемый авторами вычислительный алгоритм основан на методе Дейкстры. Несмотря на некоторые ограничения, свойственные исходному методу поиска оптимального пути на ориентированном графе, этот алгоритм позволяет решить задачу в широком круге условий и с хорошими вычислительными характеристиками.

Интерфейсные возможности модели ремаршрутизации обеспечивают эффективную работу исследователя на всех этапах ремаршрутизации. Некоторые особенности этого процесса продемонстрируем на примере решения следующей задачи.

Пусть прогнозируемая интенсивность ВД в РФ характеризуется ожидаемыми проблемами с пропускной способностью в определенном регионе (север Европейской части РФ). В дни наиболее напряженного движения в этом регионе в секторах Вологодского и Котласского районов ОрВД (УЛВВ/Север и УЛКК/ВВП) наблюдается превышение ИВП над НПС в двенадцатом часу (УЛВВ/Север (Вологда) – превышение на шесть рейсов, УЛКК/ВВП (Котлас) – превышение на восемь рейсов (рис. 2 – темная закрашка указанных секторов)).

Попытка ремаршрутизации основного потока ВД (в направлении восток-запад), приводящего к нарушению НПС, в рамках существующей трассовой структуры ВП РФ не дает положительных результатов. Хотя в ранее «перегруженных» секторах нарушения НПС ликвидированы, но ремаршрутизированный поток ВД привел к прогнозируемому превышению НПС в новом секторе УУЫП/ВВП (Печора) (рис. 3), расположенном северо-восточнее. Облет же двух «перегруженных» секторов с южной стороны неэффективен в связи с недостаточно плотной трассовой структурой в этой области. Принимается решение о прокладке новой трассы в обход чрезмерно загруженного воздушного пространства районов Вологда и Котлас.

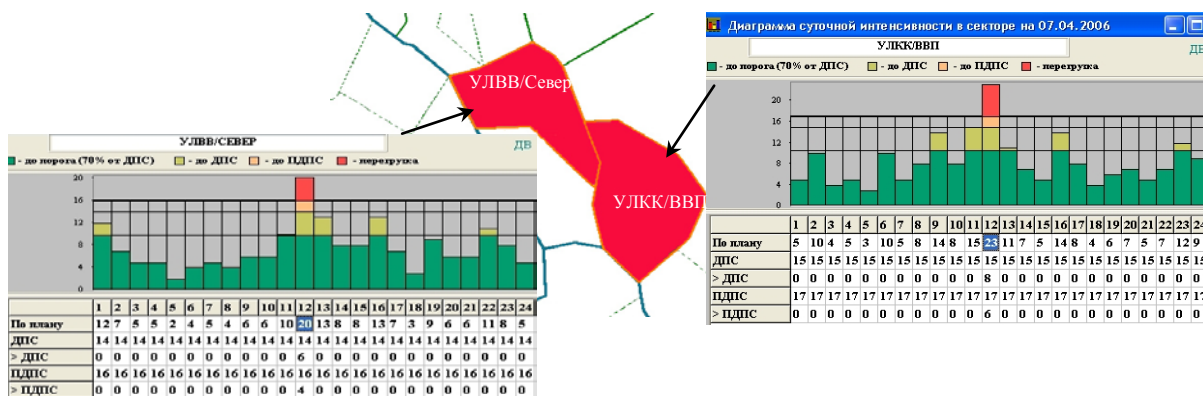


Рис. 2. Превышение ИВП над НПС в секторах УЛБВ/Север (Вологда) и УЛКК/ВВП (Котлас)

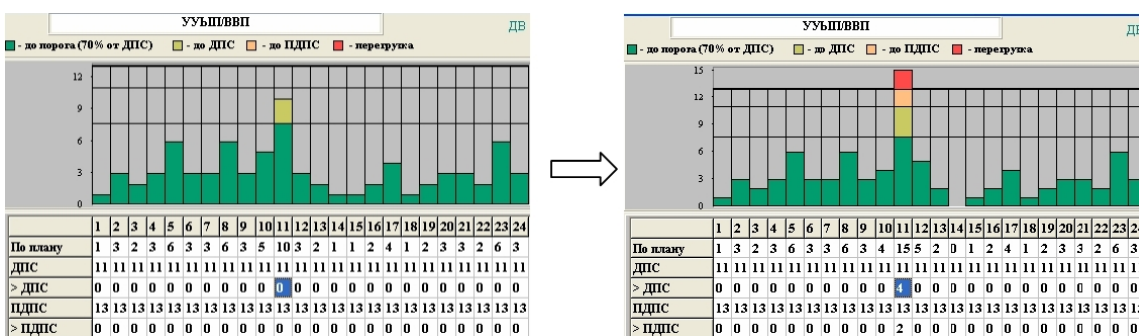


Рис. 3. Возникновение перегрузки в результате ремаршрутизации

«Прокладка» новой обходной трассы (рис. 4, новая трасса, соединяющая точки КР и ГОГЕН и отображенная толстой сплошной линией) была осуществлена с использованием специального автоматизированного средства в составе КИМ ОрВД. Расположение точек ВТ, другие характеристики трассы определяются и задаются исследователем. В рамках КИМ ОрВД предоставляется возможность формирования нового «обходного пути» автоматически и оптимальным образом, используя процедуры прокладки маршрутов в рамках правил «свободных полетов». Проложенная новая трасса («дублер» трассы Р30 между точками КР и ГОГЕН) позволяет рейсам облететь «проблемное» воздушное пространство южнее, проходя при этом через воздушное пространство слабо загруженных секторов.

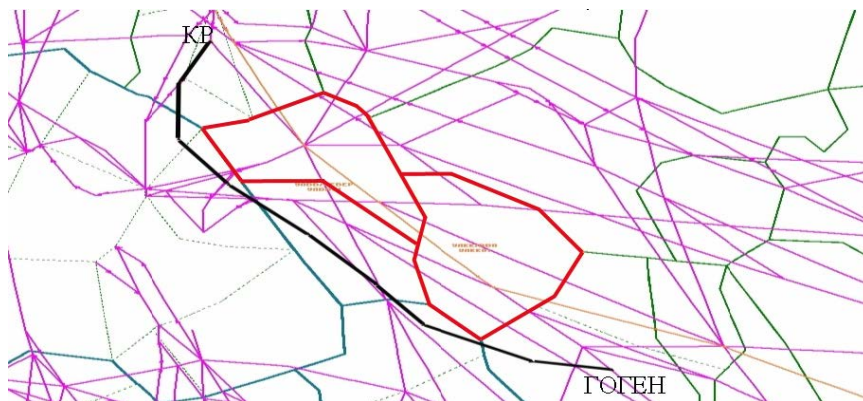


Рис. 4. Новая трасса между точками КР и ГОГЕН

Последующая ремаршрутизация потока ВД, пролетающего через указанные точки, приводит к переориентации его с трассы Р30 на вновь проложенную трассу. Анализ ИВП региона (см. карту и диаграмму на рис. 5) показывает, что в ранее проблемных секторах УЛВВ/Север и УЛКК/ВВП превышения ИВП над НПС нет. Не возникло нарушения НПС также и в других секторах (УУЫП/ВВП) региона.

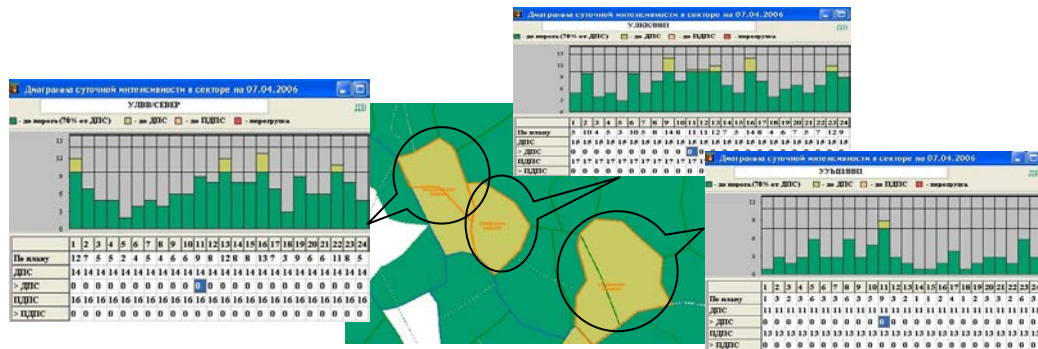


Рис. 5. Результат ремаршрутизации – соответствие ИВП НПС

**Выводы.** В докладе поставлена одна из задач управления структурой воздушного пространства системы ОрВД – формирование новых воздушных трасс или их частей. Задача может решаться в автоматическом или автоматизированном режиме. Показано, что для поддержки проектировщика целесообразно использовать разработанный ранее инструмент для прогнозных исследований задач ОрВД – программный комплекс имитационного моделирования систем ОрВД. При этом оказываются крайне полезными как исследовательские компоненты комплекса, так и имеющиеся средства синтеза. Ключевой подсистемой КИМ ОрВД, позволяющей реализовать практически все этапы создания новых трасс, является модель ремаршрутизации и процедуры формирования оптимальных маршрутов в условиях ограничений использования воздушного пространства.

Приведенный пример демонстрирует особенности проведения исследований, связанных с прокладкой новых трасс и основанных на использовании КИМ ОрВД, и показывает его возможности при решении задач синтеза воздушного пространства.

### Литература

1. Degtyaryev O. V., Egorova V. P., Zubkova I. F., Kan A. V., Chutkov V. A. Regulated Traffic Flow Simulation Tool (RATFST), 16<sup>th</sup> IFAC Symposium on Automatic control in aerospace, Preprints. 2004. Vol. 1. S. 550.
2. Дегтярев О. В., Егорова В. П., Зубкова И. Ф., Кан А. В. Комплекс имитационного моделирования УВД//Труды НТК «Авиационные системы в XXI веке». Москва. Т. 2, 2006.
3. Дегтярев О. В., Егорова В. П. и др. Особенности моделирования этапов планирования потоков воздушного движения с использованием КИМ УВД//Труды конференции ИММОД-2005. Санкт-Петербург, 2005.
4. EUROCONTROL Manual for Airspace Planning. Common Guidelance. Doc. № ASM.ET1.ST03.4000.EAPM.02.02. EUROCONTROL, 2003.