

КОМПЛЕКС ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОРГАНИЗАЦИИ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ (КИМ ОРВД)

0. Введение.

Система организации воздушного движения (ОрВД) отвечает за предоставление аэронавигационных услуг пользователям воздушного пространства (ВП) в соответствии с действующими нормативными документами Российской Федерации и международными нормами и правилами. Основными решаемыми данной системой задачами являются обеспечение безопасности полетов воздушных судов в воздушном пространстве, организация воздушного движения на воздушных трассах, местных воздушных линиях и в районах аэродромов, обеспечение баланса между потребностями авиакомпаний по использованию ими ВП и пропускной способностью системы, внедрение передовых методов обслуживания для увеличения пропускной способности центров ОВД и национальной системы ОВД в целом. Ее компонентами являются:

- обслуживание (управление) воздушного движения (ОВД)
- организация потоков воздушного движения (ОПВД)
- организация воздушного пространства для обеспечения ОВД и

ОПВД.

Таким образом, система ОрВД представляет собой сложную организационно-техническую систему, состоящую из большого числа взаимосвязанных и взаимодействующих в процессе функционирования подсистем, действия которых подчинены общим для всей системы целям и решаемым задачам.

Имитационное моделирование получило широкое распространение при исследовании систем, характеризующихся структурной громоздкостью и сложностью функциональных и логических связей между структурными элементами, использованием в системе в качестве управляющих элементов операторов, поведение которых не поддается точному описанию, риском и большими экономическими затратами на экспериментирование с реальными системами.

В настоящее время в мире существует не один десяток комплексов математического моделирования систем и процессов организации и управления воздушным движением. Более половины из них разработаны и эксплуатируются в США (NASA, FAA, университеты и научные подразделения корпораций). Большинство остальных средств разработано в Западной Европе (Евроконтроль, научные организации Франции, Германии, Испании). Задач, которые решаются с использованием моделирования, и их модификаций, вопросов, на которые нужно получать ответы, так много, что ограничиться одним моделирующим средством просто невозможно.

Система ОрВД России обладает рядом особенностей по сравнению с системами других стран. Это и большой объем воздушного пространства (25 млн. кв. км, протяженность 803 воздушных трасс – 532 тыс. км, из которых более 150 тыс. км являются международными), и крайняя неравномерность интенсивности воздушного движения в пространстве и во времени, и слабая информационная обеспеченность в ряде северо-восточных регионов, и особенности процедур планирования и управления. В настоящее время всеми пользователями воздушного пространства Российской Федерации выполняется более 1 млн. полетов ежегодно, из них российскими авиакомпаниями - 59 процентов полетов, авиакомпаниями других государств - около 33 процентов.

Все это приводит к необходимости создания развитых средств моделирования системы ОрВД Российской Федерации. В течение последних лет во ФГУП «ГосНИИ Авиационных систем» разработал по заказу ФГУП «Госкорпорация по ОрВД» программный Комплекс Имитационного Моделирования системы ОрВД РФ (КИМ ОрВД – свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2005612007 от

08.08.2005). Данный комплекс необходим для поддержки служб перспективного планирования органов системы ОрВД РФ при принятии ими стратегических решений по ее совершенствованию и модернизации.

1. Назначение комплекса

Комплекс имитационного моделирования систем ОрВД (КИМ ОрВД) является средством поддержки специалистов по ОрВД при проведении исследований по:

- разработке и оценке мер по совершенствованию системы ОрВД, включая модернизацию структуры системы и воздушного пространства и применение мер по регулированию потоков воздушного движения;
- оценке эффективности и безопасности использования воздушного пространства по множеству показателей и в произвольных условиях выполнения полетов;
- оценке показателей экономической эффективности полетов, что особенно важно для пользователей ВП.
- оценке влияния изменения состояния системы ОрВД и воздушного пространства и условий выполнения полетов на эффективность использования ВП (ИВП).

Комплекс имитационного моделирования системы организации воздушного движения Российской Федерации (КИМ ОрВД)

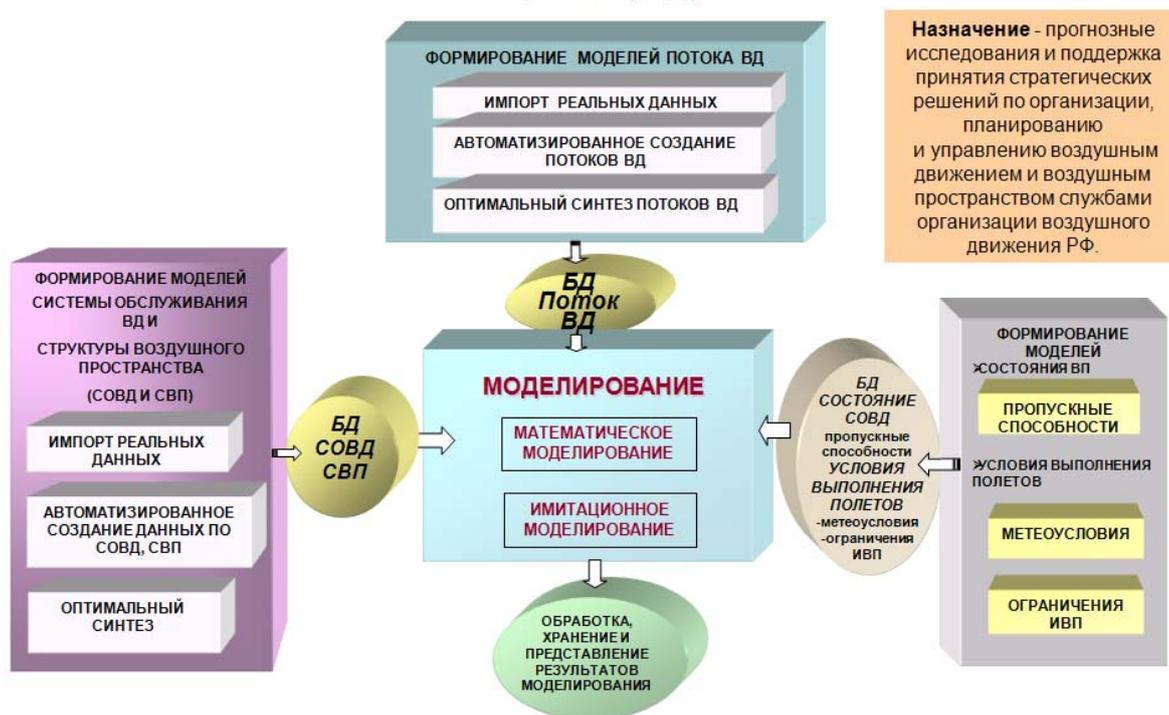


Рисунок 1. Схема процессов в КИМ ОрВД

2. Структура комплекса

Аппаратно КИМ ОрВД развернут на локальной сети, включающей сервер и ряд автоматизированных рабочих мест на основе персональных компьютеров. Автоматизированные рабочие места функционально специализированы:

-АРМ взаимодействия с внешними источниками данных предназначено для организации работы по выбору необходимых данных в банках данных других автоматизированных систем (в описываемой версии КИМ ОрВД – это базы данных

автоматизированной системы ГЦ ЕС ОрВД РФ), трансформации их в форматы баз данных КИМ и организации хранения в «библиотеках» КИМ.

-АРМ подготовки данных предназначено для организации предварительной подготовки данных по всем составляющим тетрады исследуемого сценария. Результаты такой подготовки помещаются также в «библиотеки данных» и могут быть оперативно использованы любым исследователем.

-АРМ исследователя-экспериментатора является основным рабочим местом, на котором организуется подготовка моделируемого сценария, собственно моделирование, анализ и обработка результатов моделирования.

-АРМ администратора БД КИМ. Обеспечение многовариантности различных составляющих исходных данных сценария, требование возможности использования их при моделировании в любой комбинации могут привести к нарушению целостности и согласованности данных между собой. Необходимы средства автоматизированного анализа данных, выявления «несоответствий» и их устранения.

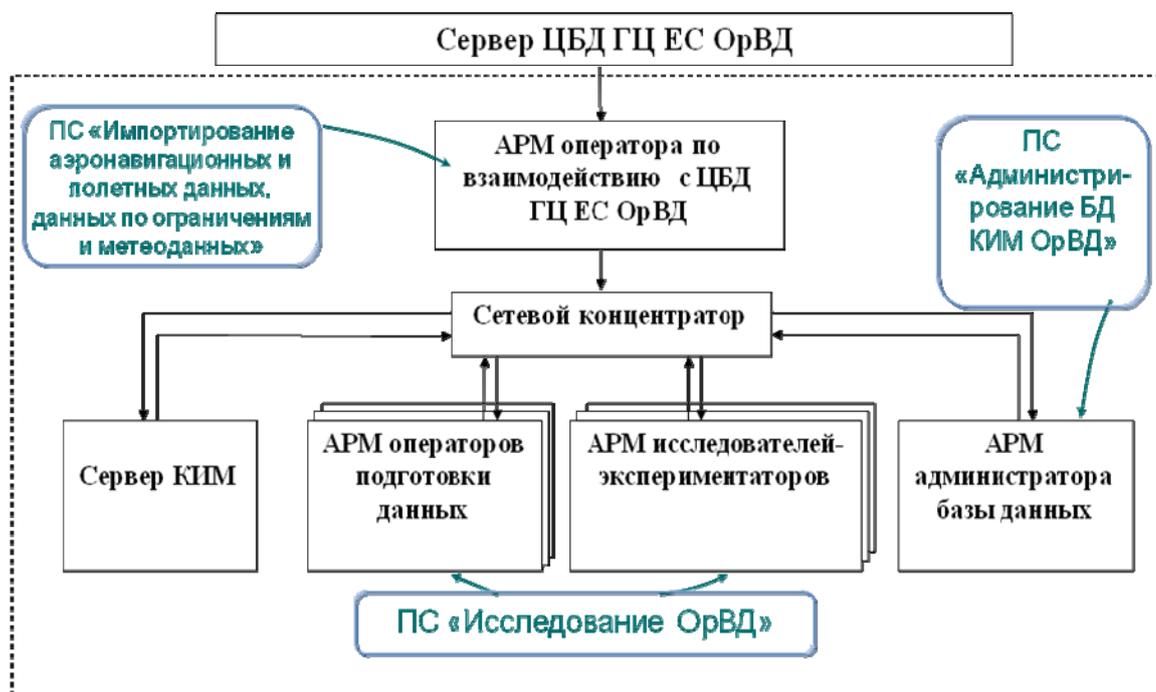


Рисунок 2. Аппаратная структура КИМ ОрВД

3. Структура программного средства «Исследование ОрВД»

Комплекс содержит три программных средства, первое из которых отвечает непосредственно за проведение исследований, второе – за импортирование данных и третье – за контроль целостности баз данных. Наибольший интерес представляет структура первого программного средства – ПС «Исследование ОрВД», предназначенного для предварительной подготовки данных, для проведения исследований путем расчетного и имитационного моделирования, а также анализа полученных результатов.

ПС «Исследование ОрВД» состоит из 14 моделей, позволяющих решать различные задания для поддержки исследований:

1) *Информационно-справочная модель.* Модель взаимодействует со всеми остальными модулями программы, предназначена для информационной поддержки при проведении исследований.

2) *Модель расчета и анализа характеристик ИВП.* В модели задействованы расчетные процедуры для оценки показателей ВД. Также модель предназначена для визуализации результатов моделирования.

3) *Модель ограничений ИВП.* Процедуры модели предназначены для формирования ограничений ИВП.

4) *Модель исследовательских потоков.* Модель формирует исследовательские потоки, включая прогнозные потоки. Сформированные потоки (подпотоки) используются в других моделях при моделировании.

5) *Модель формирования и расчета пропускных способностей секторов УВД РЦ.* С помощью процедур производится оценка пропускной способности сектора РЦ с учетом реальных полетных данных.

6) *Модель автоматизированного создания и редактирования районных центров и секторов УВД РЦ.* Модель предназначена для формирования вариантов данных по структуре районных центров и секторов.

7) *Модель автоматизированного создания и редактирования трассовой структуры (точек, участков ВТ, воздушных трасс).* Модель формирует данные по трассовой структуре.

8) *Модель зоны свободных полетов (ЗСП).* В модели происходит формирование зон свободных полетов различной конфигурации.

9) *Модель метеоданных.* Формирование метеоданных для дальнейшего учета метеоусловий в проводимых исследованиях.

10) *Модель построения маршрута и ремаршрутизации.* Построение 4-D оптимальных маршрутов и ремаршрутизация подпотока рейсов.

11) *Модель радиотехнических средств.* Производит формирование данных по радиотехническим средствам.

12) *Модель стратегической секторизации.* С помощью оптимизационных процедур в модели производится деление ВП районного центра на сектора.

13) *Модель динамической секторизации.* Модель содержит процедуры для оптимального определения конфигураций и графиков работы сектора ОВД.

14) *Модель динамической воздушной обстановки (ДВО).* Воспроизводит выполнение на карте заданного плана полетов.

Ниже изображена схема взаимодействия моделей от процесса подготовки данных до анализа и вывода полученных результатов.

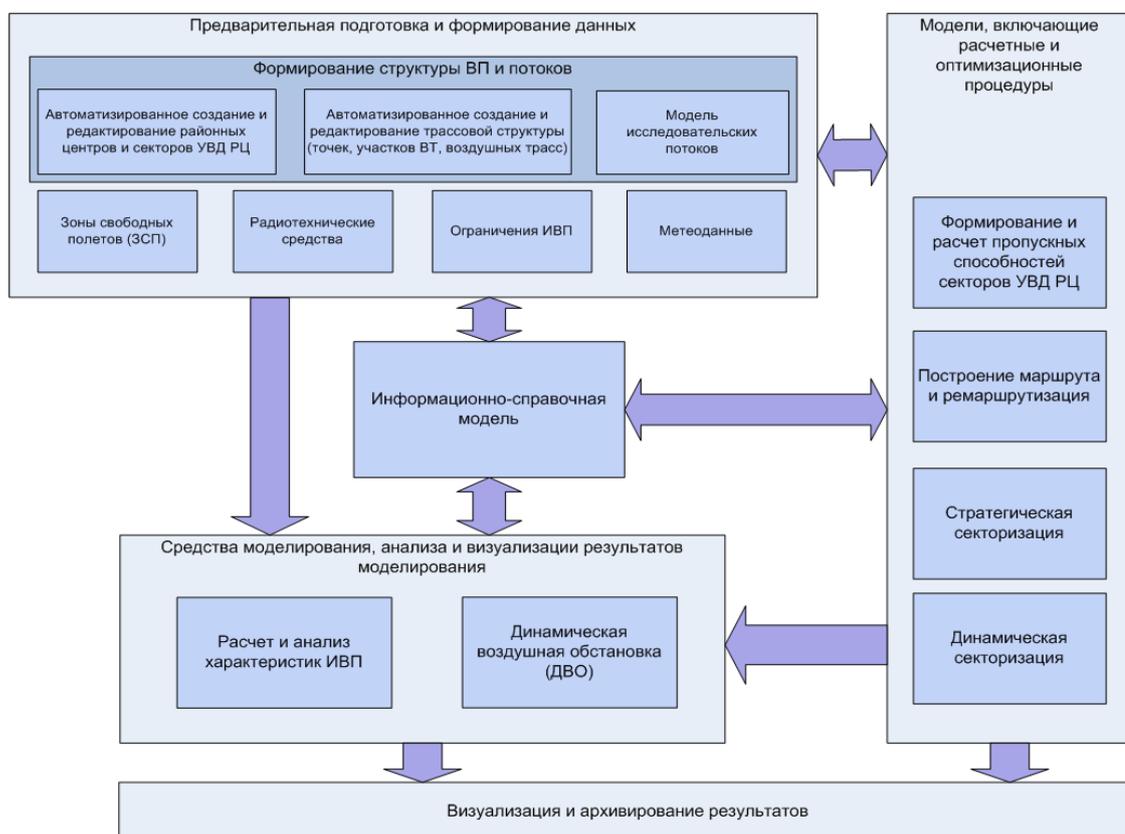


Рисунок 3. Структура взаимодействия моделей КИМ ОрВД

4. Функциональные возможности

4.1. Подготовка данных

Подготовка данных к моделированию является важной и трудоемкой частью исследований, поскольку может занимать не меньше времени, чем проведение самого моделирования.

В комплексе реализованы два варианта подготовки данных к моделированию:

1). Один из способов подготовки данных является настройка сценария на исследовательский вариант (с использованием библиотек). Реализованные возможности позволяют автономно настраивать комплекс на варианты различных по структуре данных, импортированных из ЦБД ГЦ ЕС ОрВД. С помощью соответствующих средств возможна настройка на вариант данных:

- по трассовой структуре (включает в себя настройку сценария на дату трассовой структуры, настройку на вариант изменений по трассовой структуре, настройку на нормы эшелонирования (RVSM, СНГ));

- по структуре РЦ и секторов ОВД;

- по варианту полетных данных (поток ВД);

- по ПС секторов ОВД;

- по ограничениям ИВП;

- по зонам свободных полетов.

2). Другой важной составляющей подготовки данных является автоматизированное формирование вариантов данных. Для выполнения поставленных задач исследователь может формировать данные в соответствии с заданием на исследования.

Одной из наиболее важных частей КИМ ОрВД является формирование исследовательских потоков ВД. Данная модель позволяет формировать поток ВД под любые заданные требования, например, для отработки методов планирования и регулирования потоков ВС. ВКИМОрВД алгоритмически и программно реализованы следующие варианты формирования исследовательского потока ВД путем видоизменения базового:

- формирование более либо менее интенсивного потока ВД по сравнению с базовым. Реализованы различные варианты изменения интенсивности: равномерное изменение интенсивности по всем направлениям, изменение интенсивности на заданном направлении, между заданными группами аэродромов, между заданными регионами;

- формирование случайного потока ВД, основанного на характеристиках набора суточных планов, сформированных исследователем. Примером использования этой функции служит синтез случайных потоков для проведения прогнозных исследований в рамках реорганизации системы ОрВД в заданном исследователем РЦ. В частности, могут быть сформированы случайные потоки ВД с изменившейся интенсивностью полетов на ближайшие плановые периоды 5-10-15 лет. Получив данные об интенсивностях и видах предполагаемых полетов, можно определить потребности в организации и видах обслуживания воздушного движения;

- формирование планов отдельных полетов, соответствующих различным критериям и выполняющих ограничения использования воздушного пространства, вытекающие из соответствующего сценария;

- формирование модельных потоков, отвечающих требованиям, соответствующих решению конкретной исследовательской задачи (например, формирование пересекающихся в точке пересечения воздушных трасс двух продольно эшелонированных потоков воздушных судов);

- формирование репрезентативного потока ВС в районе ОВД, гарантированно включающего все наиболее проблемные варианты часовых входных потоков и, в то же время гораздо менее объемного, чем полные, исходные полетные данные.

Большой задел в комплексе сделан для формирования данных по изменениям трассовой структуры ВП. Трассовая структура может быть введена с нуля, а может быть

отредактирована существующая. При формировании данных по трассовой структуре исследователь может создавать, редактировать или ликвидировать данные по точкам ВТ, участкам ВТ, данные по воздушным трассам. Также имеются средства для автоматизированного формирования данных по структуре РЦ и секторов.

Для учета ветра при проведении исследований доступны средства для формирования метеоданных (настройка на тип данных: среднестатистические, прогностические; настройка даты прогноза, настройка метеоданных).

Модель по радиотехническим средствам позволяет создавать редактировать и удалять данные по радиотехническим средствам (тип и характеристики оборудования; расположение, области действия, режим работы, интервал работы).

4.2. Визуализация

При проведении исследований большое значение имеют возможности по визуализации комплекса, так как во многих задачах качество и время проведения исследований зависит от средств визуализации, от качества отображаемых результатов моделирования или отображения объектов при проведении самого моделирования.

В комплексе реализована визуализация структуры и состояния ВП. На этапе подготовки данных или при проведении моделирования или при выводе результатов моделирования исследователь имеет следующие возможности по визуализации структуры и состояния ВП:

- отображение элементов ВП на карте в 2D и 3D (ЗЦ, РЦ, секторов ОВД, точек, участков, воздушных трасс, АП);
- отображение выбранного РЦ, секторов РЦ в 3D;
- отображение на карте участков сформированного РЦ или РЦ с измененными границами;
- отображение цветом на карте интенсивности ВД в различных элементах ВП;
- отображение границ запретных областей;
- отображение на карте зон свободных полетов;
- отображение метеоусловия на карте (отображение направления ветра, различная цветовая гамма величины ветра);
- отображение на карте полей радиотехнических средств (различная цветовая гамма для перекрытия полей).

Большое значение имеет визуализация потоков при исследованиях, особенно при выявлении направлений подпотоков или при исследованиях потенциальных конфликтов на выбранном потоке. Визуализация потоков ВД позволяет:

- отображать вертикальный профиль полета в 2D;
- отображать на карте конкретных рейсов в 2D;
- отображать на карте рейсов между парой или группой АП;
- отображать пары конфликтующих рейсов.

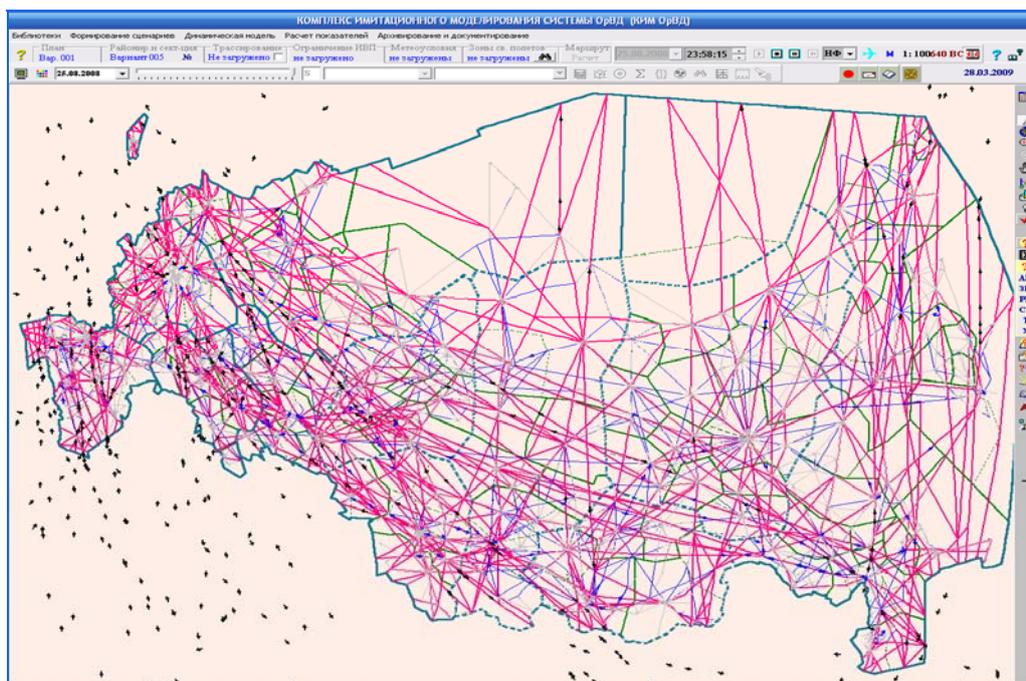


Рисунок 4. Визуализация комплекса

4.3. Моделирование

Моделирование в комплексе можно разделить на расчетное моделирование и имитационное моделирование. В зависимости от целей исследований используется то или иное, или, возможно, и последовательные исследования с использованием обоих видов моделирования.

Расчетное моделирование используется при проведении исследований по оценке, например, эффективности использования трассовой структуры или структуры РЦ или секторов, при оценке потенциальных конфликтов или оценке выработанных предложений по структуре ВП. Для оценки в средстве предусмотрен расчет следующих показателей ВД:

- интенсивности ВД в элементах ВП (в РЦ, в секторе ОВД, на участке ВТ, в точке, в АП вылета, прилета);
- временной загруженности диспетчеров секторов ОВД и РЦ;
- парных ПКС (потенциально конфликтные ситуации);
- расчет показателей влияния ограничения ИВП на структуру ВП;
- расчет показателей влияния ограничений ИВП на потоки ВД.

Для демонстрации результатов моделирования в комплексе предусмотрены следующие возможности по анализу данных моделирования:

- диаграмма интенсивности ВД в элементах ВП (в РЦ, в секторе ОВД, на участке ВТ, в точке, в АП вылета, прилета);
- диаграмма временной загруженности диспетчера;
- анализ ПКС;
- анализ показателей, характеризующих интенсивность ВД в элементах ВП (циклограмма суточной интенсивности ВД, интегральная интенсивность по ИВД, количество рейсов, участвующих в перегрузках секторов ОВД; максимальное количество ВС, находящихся под управлением диспетчера; среднее число ВС, одновременно находящихся под управлением диспетчера; среднее время пребывания ВС в секторе; статистические характеристики ИВД в секторах; распределение налетов в секторе ОВД).

При имитационном моделировании заданных планов полетов ВС доступно управление процессом моделирования, полет ВС имитируется с учетом ошибок самолетовождения и ошибок навигационных систем, учитываются различные случайные факторы, в том числе, по временным характеристикам работы диспетчера и случайные условия, например, метеобстановка.

Для обеспечения возможности анализа как непосредственно во время дискретно-событийного моделирования процессов планирования и динамического моделирования выполнения полетов, так и после окончания такого моделирования (послеполетный анализ) в составе комплекса реализуется спектр средств анализа производительности, безопасности и регулярности полетов в картографической, табличной, графической формах. Эти средства предназначены как для получения интегральных оценок, так и для более детального анализа отдельных элементов ВП или системы, отдельных полетов, отдельных событий.

4.4 Применение оптимизационных процедур для решения разного рода задач

Одним из главных достоинств комплекса, в отличие от других комплексов (в том числе и зарубежных), является наличие в комплексе ряда оптимизационных процедур, позволяющих решать различные исследовательские задачи.

Построение оптимальных 4-D маршрутов

Для задачи построения маршрута в комплексе реализована модель построения оптимальных 4-D маршрутов в условиях различных ограничений.

Данная возможность позволяет строить 2D,3D,4D маршруты, прокладывая оптимальные маршруты между любыми парами точек с учетом различных правил полета по ВП РФ.

При построении оптимального маршрута реализован учет ЛТХ ВС (использование данных ВАДА или использование данных о ВС из ЦБД ГЦ ЕС ОрВД), учет различных ограничений (запретные зоны, ПКС, интенсивность ВД в элементах ВП), учет условий выполнения полета (ЗСП, метеоусловия, предпочтительного эшелона полета, условиях пролета точки, условие близости к выбранному маршруту).

Также реализован расчет показателей экономичности выполнения полетов, что является необходимым в исследованиях в интересах пользователей ВП. Динамические показатели эффективности выполнения полетов ВС учитывают затраты топлива, индивидуальные для каждого типа самолета, а также затраты на обслуживание ВС при полете на маршруте и в терминальной области. В качестве средств анализа реализованы: журнал маршрутов, график полетов, профиль маршрута.

Оптимальная секторизация

При исследованиях в поддержку выработки предложений по делению ВП районного центра на сектора в комплексе реализована модель оптимальной секторизации. Модель содержит процедуру оптимального деления ВП РЦ ОрВД на элементарные сектора. Позволяет проводить секторизацию при различных вариантах:

- временных затрат диспетчера на отдельные операции;
- весовых коэффициентов критерия оптимизации;
- ограничений на допустимую временную загруженность диспетчеров, на максимальную разность временной загруженности диспетчеров РЦ, на минимальную и максимальную длину полетов ВС ВП сектора, а также реализован учет дополнительных требований по секторизации.

Также реализована задача динамической секторизации, необходимая при исследованиях, касающихся адаптации структуры ВД, обслуживаемой диспетчерами, под изменения интенсивности ВД. Реализована процедура по определению оптимальных конфигураций и графиков работы секторов ОВД.

В комплекс заложена модель оценки пропускной способности сектора РЦ с учетом реальных полетных данных, основанная на моделировании.

4.5. Имитация регулирования потоков ВД

В качестве средств, использующихся также при процессах планирования потоков ВД, в комплексе заложены процедуры имитации регулирования потоков ВД, такие как:

интегральная коррекция суточного плана ВД путем назначения слотов вылета и ремаршрутизация подпотока ВД.

Процедура ремаршрутизации подпотока ВД позволяет: производить выбор подпотока для проведения ремаршрутизации (полный план полетов, рейсы, проходящие через запрещенные области ВП); производить выбор из подпотока рейсов-кандидатов для ремаршрутизации: вылетающих/прилетающих из выбранных групп АП; пролетающих через одну/две точки ВП; по выбранной авиакомпании, по выбранному времени вылета/прилета; проходящих по выбранной трассе; по типу ВС.

Возможен учет различных условий при ремаршрутизации (критерий оптимальности, учет различных ограничений, дополнительные условия). А также реализованы средства для анализа результатов ремаршрутизации, которые включают анализ интегральных характеристик и изменения после ремаршрутизации по каждому рейсу.

5. Заключение

Комплекс имитационного моделирования обладает широким спектром возможностей для проведения исследований в поддержку специалистов по ОрВД. Одни из главных преимуществ комплекса являются:

- наличие оптимизационных процедур в различных задачах;
- понятный пользователю человеко-машинный интерфейс;
- взаимодействие с другими средствами моделирования;
- возможность моделирования потоков ВД на дату, отличную от даты структуры воздушного пространства.

КИМ ОрВД содержит различные средства, как для самого моделирования, так и для анализа полученных результатов. По сравнению со многими зарубежными средствами в комплексе реализовано взаимодействие моделей, предназначенных для реализации различных задач. Тем самым расширяются возможности для проведения исследований, затрагивающих различные направления.