

Ю.Б. Беляев, докт. техн. наук, Т.Ф.Шмелева, канд. техн. наук, П.П.Кудь,
С.А.Власов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ АВИАЦИОННОГО ТРАНСПОРТА В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОДИНАМИЧНОЙ СТРУКТУРЫ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОРМАЛИЗМА ДИСКРЕТНЫХ СИТУАЦИЙ

Вступление. В условиях стремительно возрастающего объема потоков воздушного транспорта под влиянием кризисных ситуаций, становится актуальной проблема гибкого и рационального использования большинства элементов, участвующих в обеспечении безопасности, регулярности и эффективности полетов. Научные изыскания в целях решения данной проблемы находится как в плоскости моделирования систем реального времени, реализовавшейся в концепции CNS/ATM (Communication Navigation Surveillance/Air Traffic Management) [1], так и в плоскости предварительного планирования движения воздушных судов (ВС). Следуя ужесточению требований к пропускной способности воздушного пространства (ВП), посредством введения ряда условных элементов (условные маршруты, зональная навигация), увеличивающих его привлекательность среди операторов и эксплуатантов ВП, усложняется и его структура [2].

Современные подходы к решению проблем, связанных с предварительным планированием, уже не ограничиваются штурманскими расчетами перед выполнением того, или иного рейса с подготовкой соответствующего плана полета. Правильная постановка задачи дополняется параметрами учета загрузки секторов ВП, а, следовательно, оказывается прямое влияние на безопасность полета в рамках взаимодействия экипажа воздушного судна (ЭВС) и диспетчера службы управления воздушным движением (УВД) [3]. В результате складывающейся ситуации, просматривается тенденция к региональному использованию объединенного воздушного пространства целых государств, что выводит процесс планирования полета из области аналитического моделирования, в область системного подхода с учетом многих факторов, в том числе кризисных ситуаций, носящих стохастический характер. Источником входных данных для процесса планирования в рамках регионального использования воздушного пространства, является интегрированная база знаний (БЗ) аэронавигационной информации, охватывающая все сектора, входящие в регион. С использованием указанной БЗ может быть найдено оптимальное решение из расчета загрузки секторов, однако такой подход к планированию не покрывает случаев непредусмотренных изменений в структуре воздушного пространства, обусловленных экстренными ситуациями, проявляющимися после формирования плановой информации для диспетчеров УВД. Указанные кризисные ситуации могут проявляться как вследствие авиационных происшествий, так и в результате факторов, которые непосредственно не связаны с выполнением полетов, например, резкое ухудшение погодных условий или обострение вооруженных конфликтов в «горячих» точках.

Для изучения влияния изменений, вызванных непредвиденными ситуациями, возникшими после обработки плана полета ВС системой предварительного планирования, но до момента наступления самих ситуаций (наложение ограничений на использование определенных зон воздушного пространства), предлагается моделировать полет ВС соответственно подаваемому плану, с учетом поступающих изменений с применением формализма дискретных событийных систем [4].

Постановка задачи. Для построения модели движения ВС принято использовать систему дифференциальных уравнений, количество которых в системе определяется решаемыми задачами. Например, летный тренажер требует определения управляющих воздействий для изменения положения кабины пилотов посредством действия гидравлических поршней, в то время как для диспетчерского, требуется определение географических координат и высоты ВС, которые отображаются на индикаторе радиолокационной обстановки диспетчера УВД в виде метки. Если для задачи моделирования летного тренажера определяется большое количество параметров движения одного ВС, то для задачи предварительного планирования необходимо учитывать положения множества ВС (в рассматриваемом регионе) и текущее состояние ВП. Учитывая ресурсоемкость решения систем дифференциальных уравнений для всех ВС, а так же событийный характер изменений структуры воздушного пространства, применяется формализм дискретных событийных систем [4].

Для описания плана по выполнению полета используется стандартизированная ИКАО (Международная Организация Гражданской Авиации)¹ форма описания маршрута движения ВС [5], в которую включается следующая информация:

- тип воздушного судна;
- аэродромы вылета, назначения и запасные, время вылета и посадки;
- последовательность воздушных трасс, задействованных в процессе движения ВС;
- точки смены воздушных трасс;
- точки смены эшелона полета;
- скорости и эшелоны пролета для каждого участка полета;
- ожидаемое время достижения указанных элементов.

Данные о характеристиках элементов, составляющих план полета, содержатся в аэронавигационной БЗ. Хотя аэродромы характеризуются множеством параметров (характеристиками взлетно-посадочных полос и рулежных дорожек, регламентом работы аэродромных служб, характеристиками средств захода на посадку), для интерпретации плана полета достаточно нескольких: четырехбуквенного идентификатора и геодезических координат контрольной точки аэродрома [6]. Воздушные трассы представляются как перечень навигационных точек (Waypoints) и средств (NDB, VOR, DME, TACAN, либо их комбинация) [7], вертикальных границ и регламента работы. Навигационные точки представляются в виде геодезических координат или уникальных пятибуквенных идентификаторов, которые при помощи запроса к БЗ также преобразуются в геодезические координаты. К свойствам навигационных средств помимо геодезических координат и уникальных идентификаторов относятся также их физические характеристики (частота работы передатчика и его позывной), которые обрабатываются навигационной системой ВС [8]. Отличительной особенностью средств навигации является их активное участие в процессах УВД, в то время как навигационные точки являются лишь геодезической абстракцией. Известно, что полет ВС производится в пределах воздушных трасс. Последние выражаются в виде произвольной ломаной линии, хотя и с некоторыми ограничениями, точки излома которой обозначаются навигационными точками или навигационными средствами. Поскольку в плане полета не всегда явно предусматривается наличие всех промежуточных (поворотных) пунктов, для получения полной информации выполняется запрос к аэронавигационной БЗ. При помощи такого запроса устанавливаются геодезические координаты всех навигационных точек и средств, необходимых для моделирования движения ВС. Однако информация о маршруте ВС не является достаточной для решения задачи планирования в полной

мере. Важная роль в процессе планирования отводится, также, учету всех ограничений, при помощи которых вводятся запреты на использование определенных объемов воздушного пространства. Такие ограничения условно разделяются на два класса: *предопределенные* - известные заранее, информация о которых уже содержится в БЗ, и *случайные* - имеющие стохастическую природу. К классу предопределенных ограничений относятся зоны ограничения полетов, тренировочные, опасные и запретные зоны. Перечисленные элементы воздушного пространства определяются трехмерным геометрическим описанием и расписанием работы (рис. 1). Случайные ограничения проявляются в виде целого спектра факторов: от невозможности использования отдельных сегментов воздушных трасс до закрытия целых секторов воздушного пространства. Очевидно, возникает необходимость четкого отделения информационной составляющей от самой математической модели. Преимущества такого четкого разделения особенно явно проявляется в возможности использования единого информационного репозитория для всего спектра задач, связанных с УВД, в том числе и с учетом регионального базиса [9,10].

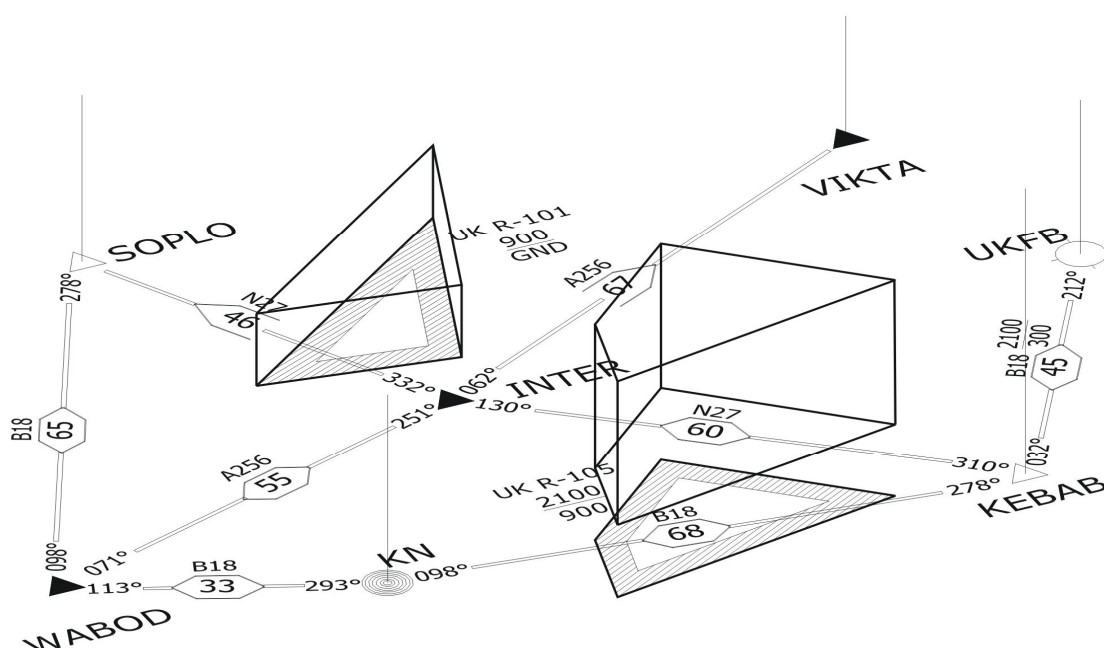


Рис. 1. Геометрическое представление пространства с ограничениями.

Математическая модель, построенная с учетом описанной постановки задачи, может использоваться для получения таких практических результатов:

- возможность изучения влияний разнообразных случайных факторов на регулярность и безопасность воздушного движения;
- сбор и анализ статистических данных о наибольшей загруженности, как в рамках отдельных секторов, так и на участках воздушных трасс;
- возможность выявления критических, с точки зрения загруженности, направлений;
- визуализация воздушной обстановки в регионе с целью проведения ее наглядного анализа;
- оптимизация распределения грузов воздушного пространства по секторам.

Построение математической модели. Несмотря на то, что процесс изменения воздушной обстановки является динамическим и непрерывно развивающимся во времени, применяются следующие допущения:

- описание движения каждого ВС с использованием системы дифференциальных уравнений является затруднительным из-за существенного количества объектов моделирования;

- учет аэродинамических факторов, характеризующих состояние модели ВС в каждый момент времени не является необходимым в рамках решения поставленной задачи;

- смена состояний структуры воздушного пространства носит стохастический характер;

- изменение состояния структуры воздушного пространства может оказывать влияние на моделируемые объекты;

- отсутствие необходимости моделирования изменения воздушной обстановки в режиме реального времени.

Если структура системы определяется топологией и характером взаимосвязи элементов, которые ее составляют, то поведение системы сопоставляется с ее состояниями. Каждое из состояний выражается через значения переменных, множество которых определяется природой самой системы. Так, переменными для определения состояния термодинамической системы, служат давление, объем и температура, а для определения состояния астрономической системы служат эфемериды небесных тел. Элементы, составляющие систему, могут иметь *атомарную* или *комплексную* природу [11]. Определения «атомарность» и «комплексность» являются лишь условностями, продиктованными постановкой задачи моделирования. Например, для моделирования процедур захода на посадку ВС, приводной радиомаяк моделируется в виде атомарного объекта системы, в то время как для изучения работы его волноводов радиомаяк является сложным комплексным объектом, состоящим из «атомарных» функциональных блоков, которые, в свою очередь, разбиваются на отдельные элементы их электронных схем и т. д.

В общем случае дискретные системы подразделяются на системы с *постоянным шагом времени* и системы *дискретного времени*. Изменение состояний системы с постоянным шагом времени предусматривается через постоянный отрезок времени Δt . В промежутках между отсчетами Δt , значения переменных, которые характеризуют состояния системы, не изменяются. При стремлении Δt к нулю, такая модель используется для имитации непрерывного процесса. Для систем дискретного времени, процесс изменения состояний происходит через различные по продолжительности промежутки времени, длительность которых коррелируется с влиянием внешних факторов, а смена состояний системы выражается в виде *событий*.

Посредством математического аппарата формализма дискретных событийных систем (DEVS)², введенного Б. Зиглером в 1976 году [12], описываются системы, построенные на базе иерархической совокупности взаимодействующих объектов. В отличие от непрерывных систем, входные данные для дискретной событийной системы не изменяются по закону кусочно-постоянной функции от времени. Взаимодействие системы с окружающей средой происходит посредством поступления в систему дискретных событий в произвольные промежутки времени. Преимущества такого формализма обуславливаются наследованием математического аппарата теории динамических систем. Указанный формализм позволяет совмещать элементы как непрерывной, так и дискретной парадигм в рамках одного объекта моделирования. Еще одно достоинство заключается в возможности синтеза модели путем комбинирования атомарных составляющих в более сложные объекты; в свою очередь, полученные объекты могут участвовать в построении еще более сложных. Иерархия, образующаяся

² DEVS – Discrete Event System Specification

в результате такого конструирования, называется деревом композиции [13]. Этим свойством предлагаемый формализм выгодно отличается от других методологий, которые традиционно используются при моделировании процессов УВД, поскольку охватывается не только «поведенческая» составляющая системы, но и моделируется динамически изменяющаяся структура объекта моделирования. Решением поставленной задачи учитывается влияние различных условностей – активация ограничений использования воздушного пространства и влияние кризисных факторов. В процессе обработки этих условностей структура модифицируется уже в процессе самого моделирования.

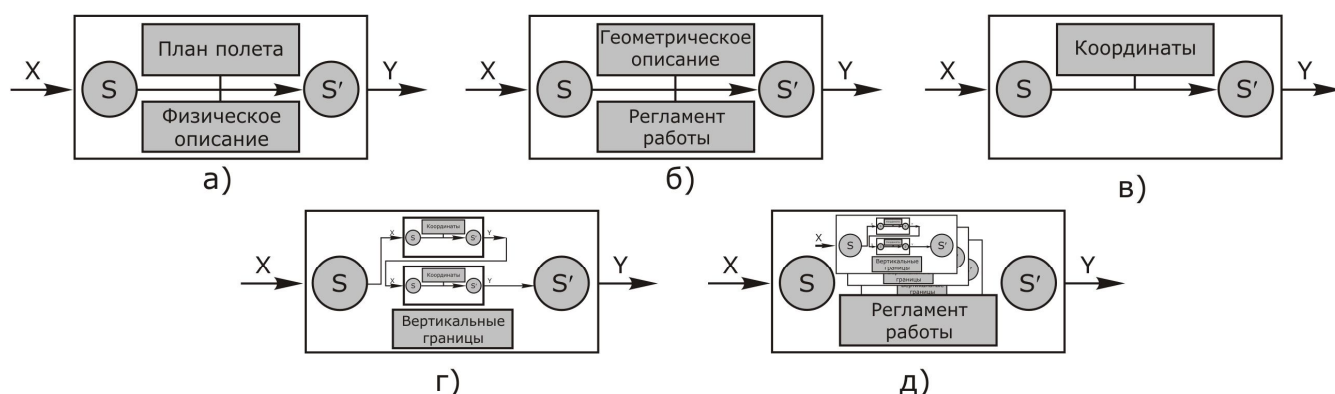


Рис. 2. Иерархия моделей.

Номенклатура объектов выражается следующим перечнем моделей:

- ВС: внутренняя физическая интерпретация изменяется в зависимости от типа ВС (поршневой самолет, турбовинтовой самолет, реактивный самолет, вертолет...), однако входные и выходные интерфейсы для моделей любых типов ВС не отличаются (рис. 2а);

- зона ограничения полетов, включая все перечисленные типы (рис. 2б);
- навигационная точка или средство (рис. 2в);
- сегмент воздушной трассы (рис. 2г);
- воздушная трасса (рис. 2д).

Модели изображенные на рис. 2а-2в в данной системе являются атомарными, в то время как модели на рис. 2г-2д – комплексными.

В общем виде модель системы описывается выражением (1).

$$M = (X, S, Y, \delta_{\text{внутр}}, \delta_{\text{внеш}}, \lambda, ta) \quad (1)$$

X - множество входных событий;

S - множество последовательно сменяющихся состояний;

Y - множество выходных событий;

$\delta_{\text{внутр}}: S \rightarrow S$ - внутренняя функция перехода, определяющая смену состояний, вызванную внутренними событиями;

$\delta_{\text{внеш}}: Q \times X \rightarrow S$ - внешняя функция перехода, определяющая смену состояний, вызванную влиянием внешних событий, где

$Q = \{(s, e) | s \in S, 0 \leq e \leq ta(s)\}$ - вектор «состояние-время нахождения модели в данном состоянии»;

$\lambda: S \rightarrow Y$ - функция генерации внешних событий;

$ta : S \rightarrow Real$ - функция, определяющая предельное время нахождения системы в данном состоянии [13].

Рассмотрим два случая функционирования модели. Первый случай связан с отсутствием внешних воздействий (событий), действующих на модель. В этом случае состояния модели меняются последовательно, согласно внутренней функции перехода $\delta_{внутр}$. Моменты смены состояний определяются функцией ta . Если модель находится в состоянии S_1 , то в состоянии S_2 модель будет через время $\Delta t = ta(S_1)$.

Второй случай проявляется в случае появления внешних воздействий (событий). Входные данные поступают в модель как дискретные события в произвольные моменты времени. Пусть в момент поступления внешнего события модель находится в состоянии S_1 в течение времени e_1 . Реакцией модели на внешнее возмущение, проявившееся в виде события X_1 , является переход в состояние S_2 , определяемое внешней функцией перехода $\delta_{внеш}$. На выходе системы генерируется событие Y_1 , посредством вычисления функции λ .

Для иллюстрации применения такой модели в рамках задач планирования полета, рассмотрим следующий пример простой системы для моделирования полета двух ВС (рис. 3а). Пусть фрагмент воздушного пространства задан графом, который характеризуется множеством вершин - навигационных точек $W = (w_1, w_2, w_3, w_4, w_5) = (IMBIR, INGUL, KEDRA, LEKTA, TOLKA)$, множеством ребер - сегментов $P = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5\} = \{(w_5, w_3), (w_3, w_2), (w_4, w_3), (w_3, w_1), (w_1, w_4)\} = \{(TOLKA, KEDRA), (KEDRA, INGUL), (LEKTA, KEDRA), (KEDRA, IMBIR), (IMBIR, LEKTA)\}$ и множеством маршрутов - воздушных трасс $R = \{r_1, r_2, r_3\} = \{(p_1, p_4), (p_3, p_2), (p_5)\} = \{((TOLKA, KEDRA), (KEDRA, IMBIR)), ((LEKTA, KEDRA), (KEDRA, INGUL)), (IMBIR, LEKTA)\}$ [14].

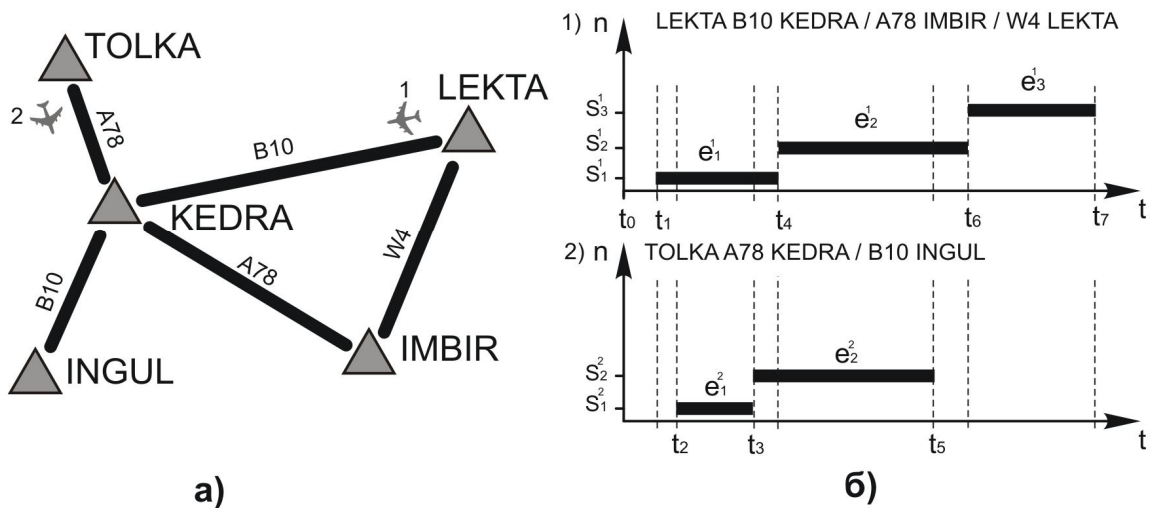


Рис. 3. Модель движения двух ВС без учета влияния ограничивающих факторов.

Для простоты вертикальные лимиты для воздушных трасс не рассматриваются. Модели ВС представляются в виде: $M = (S, Y, \delta_{внутр}, \lambda, ta)$, т.к. $X = \emptyset$ и, следовательно, $\delta_{внеш}$ отсутствует. Множество состояний для первого ВС $S^I = (s_1^I, s_2^I, s_3^I)$, где s_1^I - прохождение сегмента p_3 , воздушной трассы r_2 ; s_2^I - прохождение сегмента p_4 , воздушной трассы r_1 ; s_3^I - прохождение сегмента p_5 , воздушной трассы r_3 . Множество

событий $Y = (y_1, y_2, y_3)$, где y_1 - прохождение точки KEDRA, y_2 – прохождение точки IMBIR, y_3 - прохождение точки LEKTA.

Функции $\delta_{внутр}(s)$, $\lambda(s)$, $ta(s)$ принимают вид:

$$\delta_{внутр}(s) = \begin{cases} s_2^1, \forall s = s_1^1; \\ s_3^1, \forall s = s_2^1; \\ \emptyset, \forall s \neq s_1^1, s \neq s_2^1; \end{cases} \quad (2) \quad \lambda(s) = \begin{cases} y_1, \forall s = s_1^1; \\ y_2, \forall s = s_2^1; \\ y_3, \forall s = s_3^1; \end{cases} \quad (3) \quad ta(s) = \begin{cases} e_1^1, \forall s = s_1^1; \\ e_2^1, \forall s = s_2^1; \\ e_3^1, \forall s = s_3^1; \end{cases} \quad (4)$$

В выражении (4) отрезки времени e_1^1 , e_2^1 и e_3^1 , в общем виде, определяются из соотношений:

$$S(t) = \int_0^t V(t)dt \quad V(t) = \int_0^t a(t)dt \quad (5)$$

Однако для задачи планирования время прохождения сегмента определяется из закона равномерного движения, т.к. длины сегментов заданы конфигурацией воздушного пространства, а путевая скорость ВС задана планом полета. Для второго воздушного судна все приведенные соотношения выражаются аналогично. Множество состояний $S^2 = (s_1^2, s_2^2)$, где s_1^2 – прохождение сегмента p_1 , воздушной трассы r_1 ; s_2^2 – прохождение сегмента p_2 , воздушной трассы r_2 . Множество событий $Y = (y_1, y_4)$, где y_1 - прохождение точки KEDRA, y_4 – прохождение точки INGUL.

Функции $\delta_{внутр}(s)$, $\lambda(s)$, $ta(s)$ принимают вид:

$$\delta_{внутр}(s) = \begin{cases} s_2^2, \forall s = s_1^2; \\ \emptyset, \forall s \neq s_1^2; \end{cases} \quad \lambda(s) = \begin{cases} y_1, \forall s = s_1^2; \\ y_4, \forall s = s_2^2; \end{cases} \quad ta(s) = \begin{cases} e_1^2, \forall s = s_1^2; \\ e_2^2, \forall s = s_2^2; \end{cases} \quad (6)$$

Временные соотношения для обеих моделей ВС приводятся на рис. 3б. В момент времени t_1 начинается движение первого ВС (модель 1). Начальное состояние модели 1 – s_1^1 . В состоянии s_1^1 модель должна пробыть время e_1^1 . В момент времени t_2 начинается движение второго ВС (модель 2). Начальное состояние модели 2 – s_2^1 . Для расчета момента времени наступления следующего состояния системы, рассчитывается ближайшее время смены состояния для моделей 1 и 2. На момент появления модели 2, модель 1 находилась в состоянии s_1^1 время $\Delta t_{ум} = t_2 - t_1$. Переход в следующее состояние для модели 1 выражается промежутком $\sigma_1 = e_1^1 - \Delta t_{ум}$. Для модели 2 – $\sigma_2 = e_2^1 - 0$. Промежуток времени, через которое наступит ближайшая смена состояний σ_{min} , определяется путем выбора минимального из промежутков σ_1 и σ_2 . После каждой смены состояний моделей ВС на выходе системы генерируются события, которые могут использоваться другими подсистемами симулятора, например подсистемой визуализации. Моменты времени смены следующих состояний рассчитывается аналогично. Важным свойством такого асинхронного процесса моделирования воздушной обстановки является возможность пересчета параметров системы, только в моменты смены состояния одного из ее компонентов, а не в каждый момент времени, как это происходит для традиционных систем моделирования с постоянным шагом времени.

Следующий пример является иллюстрацией случая, когда на процессы, протекающие в системе моделирования, влияют внешние факторы. Воздушное пространство определено графом, описанным в предыдущем примере (рис. 4а).

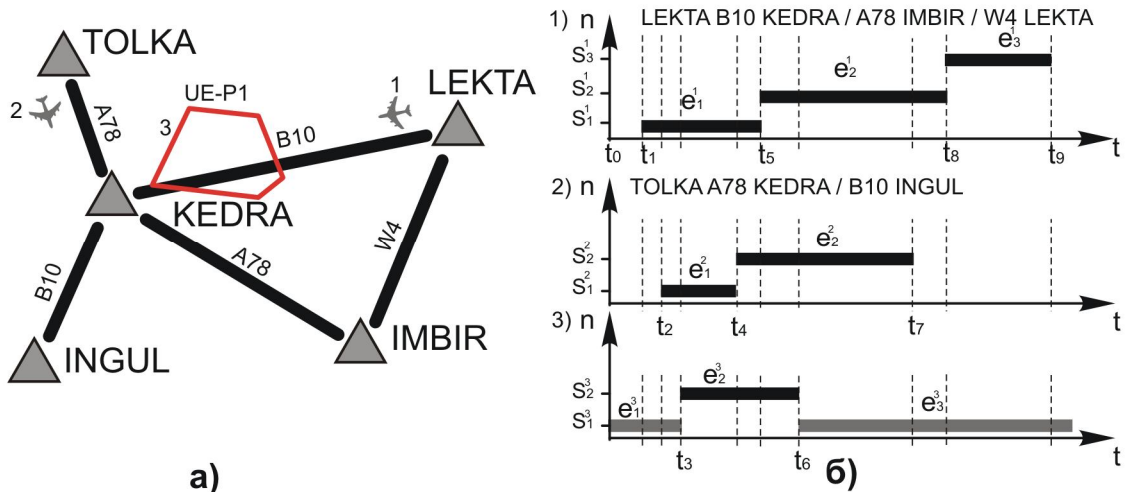


Рис. 4. Модель движения двух ВС с учетом влияния ограничивающих факторов.

Запретная зона UE-P1, характеризуется геометрическим описанием и регламентом работы. Горизонтальные границы зоны представляется в виде полигона, геодезические координаты каждой вершины которого известны. Вертикальные границы запретной зоны определяются диапазоном высот, который задается различными описаниями (абсолютными, либо относительными высотами, эшелонами полета). В нашем примере, для наглядности, рассматривается случай, когда вертикальные границы зоны охватывают весь диапазон высот, на которых допускаются полеты ВС. Информация, связанная с координатами ограничивающих вершин, вертикальными пределами и регламенте работы запретной зоны содержится в аэронавигационной БЗ. В таком случае модель запретной зоны является детерминистской. В нашем случае предполагается, что хотя геометрическое описание запретной зоны и задано строго, моменты ее активации носят стохастический характер. Поскольку моменты активации запретной зоны не определяются условиями задачи, они выражаются внешним событием x_i из множества внешних событий X . Таким образом, математическое описание модели в точности согласуется с выражением (1), в отличие от первого случая, где $X = \emptyset$.

Очевидно, что множество состояний модели запретной зоны определяется множеством $S^3 = (s_1^3, s_2^3)$, где s_1^3 – состояние, когда зона неактивна; s_2^3 – состояние, когда зона активна. Множество входных событий $X = (x_1, x_2)$, где x_1 – событие активации зоны; x_2 – событие деактивации зоны. Множество выходных событий $Y = (y_1, y_2)$, где y_1 – событие перехода запретной зоны в активное состояние; y_2 – событие перехода зоны в неактивное состояние. Поскольку для данного случая состояния модели изменяются только под действием внешних событий, функцией $ta(s)$ выдается бесконечное время для любого состояния. Функции, связанные с функционированием модели, определяются соотношениями (9).

$$\delta_{внутр}(s) = \emptyset \quad \delta_{внеш}(s, x) = \begin{cases} s_1^3, \forall s = s_2^3, x = x_2; \\ s_2^3, \forall s = s_1^3, x = x_1; \end{cases} \quad \lambda(s) = \begin{cases} y_1, \forall s = s_1^3; \\ y_2, \forall s = s_2^3; \end{cases} \quad ta(s) = \infty \quad (7)$$

Временные соотношения для обеих моделей ВС и функционирования запретной зоны приводятся на рис. 4б. Процесс смены состояний моделей ВС для данного примера не отличается от описанного ранее. Момент времени t_3 сопровождается появлением события x_1 . Реакцией системы на данное событие является переход модели

запретной зоны из состояния s^3_1 в состояние s^3_2 . После смены состояний, запретной зоной генерируется событие y_1 . Учитывая, что в этот момент времени ВС 1, находится в запретной зоне, принимается решение о невозможности выполнения полета согласно такому плану.

Вывод и заключение. Несмотря на то, что применение формализма дискретных событийных систем для решения задач планирования иллюстрируется простыми примерами, рассмотренный формализм может быть применен для моделирования сложной воздушной обстановки с большим количеством ВС. При моделировании сложной воздушной обстановки особо критичным фактором является возможность разделения математической модели и информации о самих элементах системы моделирования. Применение рассмотренного формализма позволяет четко разделить информацию и механизмы ее обработки в процессе моделирования.

Другим важным преимуществом является возможность динамического добавления новых моделей в симулятор. Хотя сокращение необходимых вычислительных ресурсов на моделирование за счет расчета параметров модели только в моменты прихода событий является преимуществом, формализм может использоваться и для моделирования систем с постоянным шагом времени. Шаг времени выбирается с учетом особенностей задачи моделирования. Например, для решения задач планирования может использоваться шаг дискретизации 1 минута, поскольку все временные интервалы для описания плана полета и регламентов работы зон ограничения задаются с точностью 1 минута. Для задач моделирования опасных сближений – 1 секунда, т.к. при средней скорости 900 км/ч ВС проходит 250 м за 1 секунду, что значительно уступает нормам горизонтального эшелонирования. Физическая модель для прямолинейного движения (5), легко дискретизируется:

$$S_{n+1} = S_n + \frac{V_{n+1} + V_n}{2} \cdot \Delta t \qquad V_{n+1} = V_n + a_{n+1} \Delta t \qquad (8)$$

Дальнейшим развитием формализма является параллельный формализм дискретных событийных систем [15], что позволяет его применять в условиях распределенных вычислительных ресурсов.

Возможность построения моделей путем иерархической композиции позволяет реализовать современные методики объектно-ориентированного программирования при построении программного обеспечения для моделирования, с его последующим внедрением в органах, связанных с деятельностью по планированию полетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глобальный аэронавигационный план применительно к системам CNS/ ATM. ИКАО - 2-е издание. - 2002.
2. Беляев А.Г. Использование нетрадиционных логик при определении бесконфликтности аэронавигационной информации. Математические машины и системы – 2002. - №2. - С. 65-74.
3. Doc 9426 - AN/924. Руководство по планированию обслуживания воздушного движения. ИКАО. – 1984.
4. Christos G. Cassandras. Discrete Event Systems: Modeling and Performance Analysis. Irwin Publ. - 1993.
5. Doc 4444 – ATM/501. Организация воздушного движения. Добавление 2. Фалйтплан. ИКАО 14-е издание. – 2001.
6. Приложение 14 к Конвенции о международной гражданской авиации. Аэродромы. Радионавигационные средства. ИКАО 2-е издание. - 1996.
7. Приложение 10 к Конвенции о международной гражданской авиации. Авиационная электросвязь. Том 1. Радионавигационные средства. ИКАО 5-е издание. - 1996.
8. Л.Н.Блохин, И.К.Кадышев. Основы навигации и пилотажно-навигационные комплексы: Учебник для вузов ГА. М.:Воздушный транспорт. – 1993.
9. Reid K. Europe takes AIM. Air Traffic Technology International. UIP. Surrey. – 2003 - С. 18-20.
10. Wybo S. Database Delivery. Air Traffic Technology International. UIP. Surrey. – 2003 - С. 40-42.
11. Zeigler B.P. Multifaceted Modeling and Discrete Event Simulation. Academic Press. London. - 1984.
12. Zeigler B.P. Theory of Modeling and Simulation. Wiley, NY.- 1976.
13. Zeigler B.P. Object-Oriented Simulation with Hierarchical, Modular Models. Academic Press. – 1990.
14. Касьянов В.Н., Евстигнеев В.А. Графы в программировании: обработка, визуализация и применение. BHV. Санкт-Петербург. – 2003.
15. Chow A. C., Zeigler B.P., Kim D. H. Abstract Simulator for the Parallel DEVS Formalism. Academic Press. – 199 p.