

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕШЕНИЙ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ  
ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ  
ТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ СИТУАЦИОННОЙ СЕТИ**

**А. В. Фараонов**

*Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова*

*Введение.* Создание ракетных комплексов связано с решением целого ряда сложных научных и инженерных задач. В области наземного оборудования, среди прочих, к таким задачам относится проблема доставки собранных в заводских условиях ракет-носителей и других грузов ракетно-космического назначения на технические и стартовые позиции по дорогам различных категорий, в том числе и грунтовым. Транспортировка продукции ракетно-космического назначения является неотъемлемой частью технологического процесса подготовки к пуску и пуска ракет космического назначения. Четкое и качественное проведение работ по подготовке к пуску ракет космического назначения определяющим образом влияет на успешное выполнение запуска. На стартовый комплекс с завода-изготовителя ракета космического назначения доставляется отдельными блоками (ступенями), поскольку целиком собранную ракету космического назначения доставить к месту старта невозможно ни одним из существующих видов транспорта. К основным факторам, влияющим на выбор вида транспорта при транспортировке продукции ракетно-космического назначения, относятся:

- наличие путей сообщения или стоимость их строительства;
- габариты груза;
- необходимая грузоподъемность транспортных средств;
- особые условия транспортировки груза (температурно-влажностный режим, уровень допустимых перегрузок, уровень напряжения корпуса при креплении к транспортному средству, защита от атмосферных осадков и ветра, безопасность режимов движения);
- требования к грузоподъемности и проходимости транспортных средств;
- допустимые удельные нагрузки на дорожное полотно;
- расстояние транспортировки;
- стоимость транспортировки;
- сроки транспортировки [1].

*Постановка задачи.* Рассматриваемая в настоящей работе задача относится к задачам о принятии оперативных решений при возникновении непредвиденной ситуации на маршруте доставки и необходимости изменения опорного плана. Разработка и исследование транспортно-логистической системы с помощью имитационной модели позволяет оценить компетентность специалиста, при принятии решений без вмешательства в работу реальной системы, растянуть или сжать время функционирования логистической системы, понять сложное взаимодействие элементов внутри системы, оценить степень влияния факторов и выявить «узкие места». Разрабатывается ситуационная модель принятия оперативных решений при возникновении непредвиденной ситуации на маршруте, корректировке опорного плана и выборе нового маршрута доставки. Ситуационный подход в принятии решений для транспортно-логистической системы предполагает, не только оценить возникшую непредвиденную ситуацию на маршруте, но и определить управляющие решения. Такое представление получило название нечеткой ситуационной сети (НСС) [2-5].

Ситуационный шаг управления представляется формулой:

$$S_{NET} : S_j \overline{u_k} S1_j \quad (1)$$

где  $S_{NET}$  – выполнение опорного плана  $S_{NET}$ ;  $S_j$  – текущая ситуация (узел  $W_i$ );  $S1_j$  – новая ситуация (узел  $W_j$ , корректировка опорного плана);  $\overrightarrow{Uk}$  – выбор маршрута в «непредвиденной ситуации» – выбор модели доставки) (рис. 1).

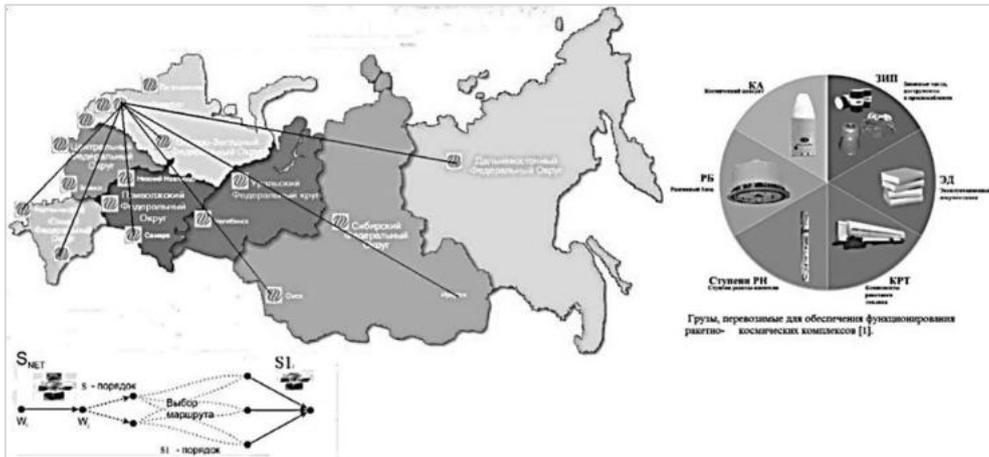


Рис.1. Ситуационный шаг управления (условный вариант).

Для «непредвиденной ситуации» требуется не просто идентифицировать ситуацию и соответствующее ей множество управляющих решений, но и определить рациональные пути достижения целей планирования и оперативного управления выбора маршрута доставки, для чего необходимо определить возможные последствия управляющих решений на несколько шагов вперед. Задачи оперативного управления выбора маршрута доставки требуют привлечения дополнительных методов, среди которых хорошо себя зарекомендовали методы, основанные на представлении совокупности типовых состояний системы в виде узлов графа, переходы которого соответствуют управляющим решениям.

Ситуационная сеть  $S_{NET}$  представлена в виде ориентированного графа  $S_{NET}(W, A)$ , где  $W$  – множество узлов – состояний, а  $A$  – множество дуг-переходов между состояниями.

$$S_{NET}(W, A) ; W = \{ w_i | i = 1 \dots N_w \} ; A = \{ a_{i,j} | i = 1 \dots N_w ; j = 1 \dots N_w \} \quad (2)$$

Метод вывода по нечеткой ситуационной сети [2,3] основывается на определении связного подграфа, содержащего некоторое начальное состояние сети  $w'$ , относительно которого ведется поиск.

$$S'_{NET} = (W', A'); W' \in W, w' \in W'; A' \{ a_{i,j} | w_i, w_j \in W' \} \quad (3)$$

Направленным нечетким графом  $S'_{NET}(W', A')$  называется пара множеств, в которой  $W' \in W, w' \in W'$  – множество вершин графа;  $A' \{ a_{i,j} | w_i, w_j \in W' \}$  – нечеткое множество направленных ребер графа, вершина  $w_i$  является началом,  $w_j$  – концом ребра  $w_i, w_j$ ;  $\mu A \langle w_i, w_j \rangle$  – значение функции принадлежности  $\mu A$  для ребра  $w_i, w_j$ .

Вид подграфа  $SNET'$  определяется типом конкретной ситуационной сети:

- для сетей, в дугах переходов которых отсутствует случайная составляющая,  $SNET'$  обычно принимает вид цепи (выполнение опорного плана);
- для сетей, учитывающих случайные факторы при переходах,  $SNET'$  ищется в виде дерева, соответствующего поливариантному сценарию управления (определяются варианты моделей).

Создание компьютерной модели логистической системы включает такие взаимосвязанные этапы, как содержательная постановка задачи; разработка концептуальной модели; разработка и программная реализация имитационной модели; оценка адекватности модели и

точности результатов моделирования; планирование экспериментов; принятие решений. Эти показатели не имеют четко очерченных оптимальных границ. Показатели дают возможность количественно оценить подготовку специалиста, определить тип поведения специалиста, и соответственно разработать как коллективную, так и индивидуальную методику подготовки специалистов.

Методика определяется следующей последовательностью действий. При возникновении «непредвиденной ситуации» в узле  $W_j$  – дальнейший маршрут определяется следующим образом [6,7]. Определяется множество альтернативных (возможных) маршрутов доставки  $\mu(j) = S_{NET} = \{S_{NET1}, S_{NET2}, \dots, S_{NETi}, \dots, S_{NETn}\}$ . Каждый маршрут характеризуется параметрами (критериями),  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_m\}$  (например, пропускная способность, расстояние, время доставки). Выбор модели доставки грузов  $\mu_{ij}$  отражает уровень соответствия  $i$ -го маршрута доставки требованиям по  $j$ -му параметру ( $\mu_{ij} \in [0; 1]$ ;  $i = 1, m$ ;  $j = 1, n$ ).

**1. Модель максимальной свертки (ММС).** Наилучшим считается маршрут при минимальных недостатках по всем параметрам.

**2. Модель абсолютного решения (МАР).** Задается минимально допустимое значение  $\mu_{ij}$  min для каждого параметра  $Y$ . Выбирается маршрут, с параметрами не хуже заданных.

**3. Модель основного параметра (МОП).** Решение производится по шагам. На каждом шаге выбирается основной параметр, и поиск наилучшего решения ведется только по нему.

**4. Модель компромиссного параметра (МКП).** Логист выбирает параметры по уровню их важности и определяет влияние каждого параметра на выбор маршрута.

**5. Модель эталонного сравнения (МЭС).** Имеется оптимальное решение на основе компромиссной модели, при этом учитываются ограничения на значения параметров. Определяется эталонный вариант маршрута доставки груза  $X_0$ . Параметры этого варианта принимаются как минимально допустимые значения параметров  $\mu_{ij} \min$ . Каждый вариант маршрута множества  $X$  сравнивается с эталонным  $X_0$ .

Разрабатывается имитационная модель принятия оперативных решений при возникновении непредвиденной ситуации на маршруте, корректировке опорного плана и выборе нового маршрута доставки (рис. 2) в среде редактора AnyLogic, анализ модели происходит в среде исполнения [6, 7].

*Обработка событий исполняющего модуля AnyLogic.* Моделирование в AnyLogic представляет собой выполнение последовательности событийных и временных шагов [9]. Чтобы связать модель с базой данных MS Access «Деловая карта», нужно вначале создать объект **database и excel File** – элемент модели AnyLogic, который будет соответствовать реальному опорному плану, и обеспечивать взаимодействие с ним. Программируются события исполняющего модуля AnyLogic – это события **event** (маршруты опорного плана), которые могут быть выполнены в данный момент. События исполняющего модуля AnyLogic хранятся в очереди сообщений. *Временной шаг.* Если текущих событий нет, то AnyLogic выполнит временной шаг до ближайшего события (или событий) в очереди, т.е., увеличит значение модельного времени.

Во время выполнения временного шага может произойти событие, вызванное тем, что выполнилось какое-то заданное условие. Дискретная часть исполняющего модуля AnyLogic не знает о том, когда выполнится условие срабатывания перехода: это зависит от системы уравнений выбора модели доставки грузов ( $\mu_{ij}$  отражает уровень соответствия  $i$ -го маршрута доставки требованиям по  $j$ -му параметру ( $\mu_{ij} \in [0; 1]$ ;  $i=1, m$ ;  $j=1, n$ )), решаемой непрерывной частью исполняющего модуля. В интерактивном режиме программы **fuzzyTECH** [9] можно не только видеть значение конечного результата  $\mu(j)$ , но и следить за промежуточными операциями. Данная возможность необходима при внесении новых переменных и правил в процедуру определения альтернативного маршрута. Демонстрация промежуточных результатов контролирует перенос правил нечеткого вывода в программу. Как только это произойдет, значение времени будет увеличено до времени, выданного решателем уравнений, и будет выполнен событийный шаг. *Событийный шаг.* На один момент времени могут быть запланированы сра-

зу несколько событий **event1** (выбор дальнейшего маршрута). Программа выберет одно из этих событий и выполнит его. Это будет повторяться до тех пор, пока не будут выполнены все текущие события.

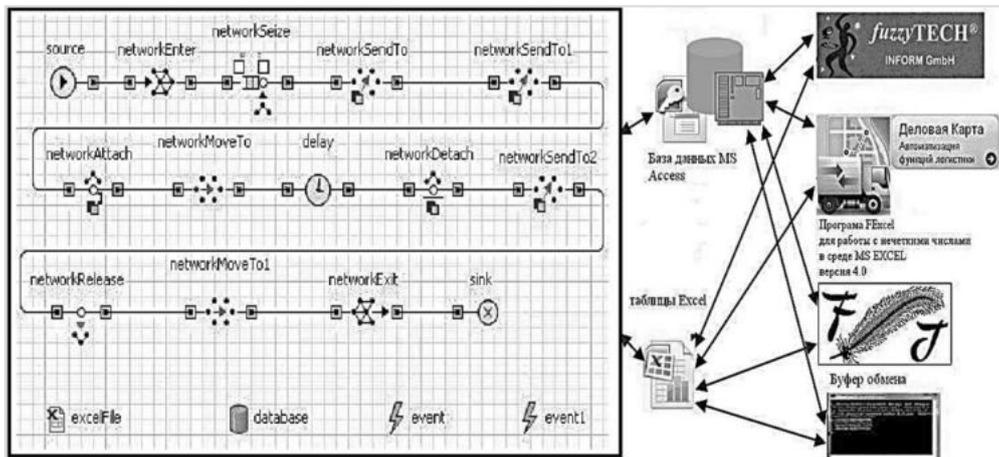


Рис. 2. Обмен данными между элементами имитационной модели

- **среде** ExtendSim8 [8]. Оператор обучается созданию и эксплуатации системы безопасности аэропорта. Инструмент имитационного моделирования нового поколения, это расширение продукта Extend® фирмы ImagineThat, основанный на результатах, полученных в теории моделирования и в информационных технологиях за последнее десятилетие, поддерживает на единой платформе существующие подходы дискретно-событийного и непрерывного моделирования (блок-схемы процессов, системную динамику, агентное моделирование, карты состояний, системы уравнений и т.д.). Объектно-ориентированный подход, предлагаемый ExtendSim 8, облегчает итеративное поэтапное построение больших моделей ExtendSim 8-модели создаются из заранее подготовленных блоков.

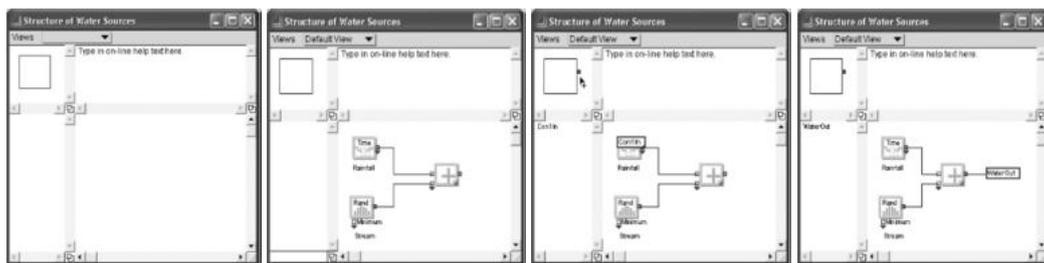


Рис. 3. Этапы разработки имитационной модели

Программа FuzzyTECH [9] позволяет оперировать лингвистическими переменными и создавать для них продукционные правила вывода. В интерактивном режиме программы FuzzyTECH можно не только видеть значение конечного результата  $\mu(j)$ , но и следить за промежуточными операциями. Данная возможность необходима при внесении новых переменных и правил в процедуру определения альтернативного маршрута.

Демонстрация промежуточных результатов контролирует перенос правил нечеткого вывода в программу. Для определения альтернативного маршрута запишем лингвистические переменные и создадим для них продукционные правила вывода (рис. 5).

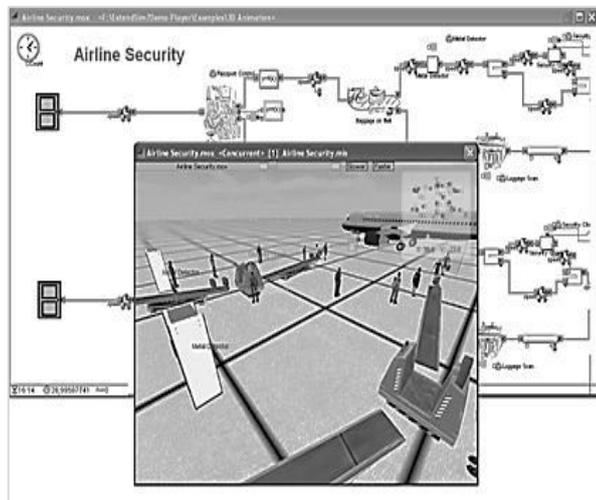


Рис. 4. Реализации имитационной модели «Авиационная безопасность» в 3D

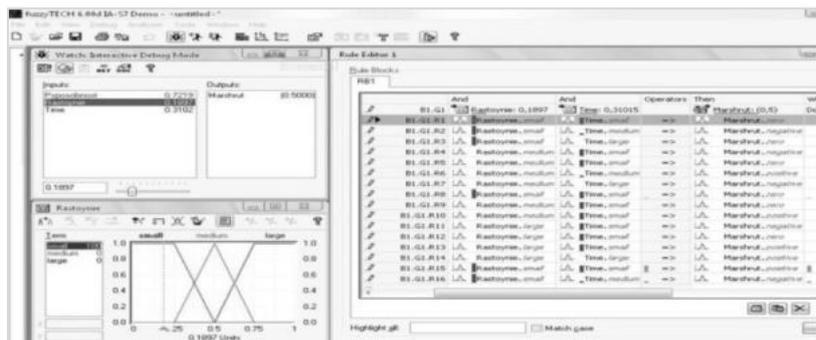
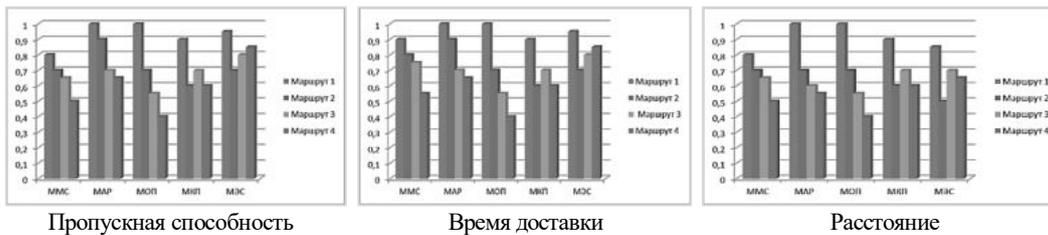


Рис. 5. Интерактивный режим программы FuzzyTech.



Определяем (Marshrut) с тремя терминами: «high», «middle» и «low» при трех входных переменных пропускная способность (Pspособnost), расстояние (Rastoynic) и время доставки (Time), получим набор правил. Логист для каждой переменной вводит вручную степень принадлежности к соответствующим терминам. Полученные значения обрабатываются в соответствии с правилами, и в таблице в правой части отображается – истинность правила в виде черного прямоугольника. Прямоугольник, закрашенный полностью, показывает на истинность, равную 1, прямоугольник не закрашенный – на истинность, равную 0. Промежуточным значениям соответствует прямоугольник, закрашенный частично. Отображение истинности

правила позволяет следить за ошибками при переносе правил в программу, а также за влиянием каждого из правил на конечный результат.

*Выводы.* Разработана имитационная модель принятия оперативных решений специалистом при возникновении непредвиденной ситуации, корректировке ситуации и выборе нового продолжения работы логистической системы, обучении необходимым квалификационным навыкам и принятия решений на основе имитационного моделирования транспортно-логистических систем, моделируемых в среде AnyLogic, ExtendSim8 и «Business Map». Алгоритм состоит из взаимосвязанных этапов, таких как содержательная постановка задачи, разработка концептуальной модели; разработка и программная реализация имитационной модели, оценка адекватности модели и точности результатов моделирования, планирование экспериментов; принятие решений, что позволяет проверить и оценить квалификацию специалистов **по времени** решения логистической системы  $S_{NET}: S_j \xrightarrow{U_k} S1_j$ .

### Библиографический список

1. Белоусова Е. А. Оптимизация управления транспортными потоками продукции ракетно-космического назначения // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». № 2/2014. С.66 – 70.
2. Фараонов А. В. Оптимизация решений в задачах управления транспортными потоками ракетно-космической техники // Международный научно-практический симпозиум «Безопасность космических полетов». 2019. СПб: 24–27 сентября.
3. Фараонов А. В. Ситуационное моделирование как метод подготовки специалистов транспортной логистики и эффективности принятия решения // Труды V МНПК «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» – «ИКМ МТМТС2019». СПб: АО «Центр технологии судостроения и судоремонта», 2019. С. 182 – 186.
4. Фараонов А. В. Ситуационное моделирование как метод подготовки специалистов в области принятия эффективных управленческих решений // Труды IX ВНПК по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2019). С. 249 – 252.
5. Фараонов А. В. Разработка ситуационной модели задачи маршрутизации при необходимости изменения опорного плана на основе нечеткой ситуационной сети. // В кн.: «XII Всероссийское совещание по проблемам управления. ВСПУ-2014». Москва, 16-19 июня 2014 г.: Труды [Электронный ресурс]. М.: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2014. С. 5101 – 5113.
6. <http://www.anylogic.ru>. Экс Джей Текнолоджис», [www.xjtek.ru](http://www.xjtek.ru).
7. [www.ingit.ru](http://www.ingit.ru). Официальный сайт «Фирма «ИНТИТ», «Деловая карта».
8. [http:// Extend®](http://Extend®) фирмы Imagine That /.
9. . <http://fuzzytech.com/>.

УДК 656.022

## ПЛАНИРОВАНИЕ ЗАГРУЗКИ ОДНОРОДНЫХ ГРУЗОВ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

А. Д. Шматко, Ю. А. Капитонов

*Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова*

Задача о перевозке грузов относится к транспортной логистике в общем смысле этого термина, а также изделий двойного назначения к военной логистике. К задачам транспортной