

# Принятие решений в задачах управления транспортными потоками ракетно-космической техники на основе нечеткой ситуационной сети

А.В. Фараонов

**Аннотация**— Перевозка ракетно-космической продукции является неотъемлемой частью технологического процесса подготовки к запуску и запуску космических ракет. Многолетний опыт работы в области ракетно-космической техники показывает, что процесс подготовки космических ракет и их компонентов для использования по назначению на космодромах остается длительным и трудоемким. Это связано с конструктивными особенностями современных космических ракет и технологий их подготовки к запуску. Высокая цена за неправильные действия или неквалифицированное выполнение технологических операций по транспортному сопровождению ракетно-космических систем определяет высокие требования к уровню и качеству транспортных и логистических услуг. В связи с этим возникает проблема научного обоснования организации системы управления транспортными потоками ракетно-космической продукции. В [1,2] были предложены методики наземного логистического анализа, основанные на оптимизации сети линейного программирования. Рассматривается ситуационная модель принятия оперативных решений при транспортировке изделий ракетно-космического назначения как неотъемлемая часть безопасного процесса подготовки к пуску. Решается задача многокритериального выбора нового маршрута доставки в условиях неопределенности, основанных на теории нечетких множеств. Проводится ранжирование альтернатив множества маршрутов и выбирается наилучшая альтернатива нового маршрута на основе нечетких множеств.

**Ключевые слова**— Оптимизация управления транспортными потоками изделий ракетно-космического назначения, маршрутизация доставки, непредвиденная ситуация, имитационное моделирование, нечеткие ситуационные сети.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях космическая деятельность является одним из основных факторов, определяющих уровень развития и влияния России, её статус государства высоких технологий. Космическая деятельность относится к государственным приоритетам, определяющим инновационные пути развития страны. Как отмечено в «Основах политики

Российской Федерации в области космической деятельности...», первоочередной задачей использования космических средств является создание информационных полей, обеспечивающих непрерывную связь; радио- и телевидение; навигацию; оперативное получение данных наблюдения из космоса земной поверхности и атмосферы; обеспечение потребителей услугами связи, координатно-временными данными, информацией наблюдения, контроля и управления; повышение эффективности, достижение глобальности и непрерывности стратегического информационного обеспечения. Выполнение такой масштабной задачи предполагает, в частности, решение взаимосвязанных оптимизационных и расчётных задач, а именно:

- задачи обоснования тактико-техно-экономических требований к перспективным комплексам наземной космической инфраструктуры, космическим аппаратам и средствам выведения;
- задачи логистического обеспечения с целью совершенствования системы поставок на космодромы ракетно-космической техники, оборудования и иных грузов;
- задачи оптимизации экономических ресурсов наземной космической инфраструктуры, необходимых для реализации программы развертывания орбитальной системы космических аппаратов [1].

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. Процесс перемещения грузов ракетно-космического назначения требует поиска рационального способа транспортного обеспечения, выбора транспортных средств, оптимального направления перевозки, форм и методов организации

транспортного процесса, анализа альтернативных решений. Общий алгоритм организации транспортировки продукции ракетно-космического назначения включает следующие процедуры:

- выбор вида транспортировки;
- выбор вида (или нескольких видов) транспорта;
- выбор основных и вспомогательных логистических посредников в транспортировке.

Особенностью обеспечения полетов космических аппаратов с помощью ракет космического назначения является то, что 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 [2].

## II. 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 нечёткой ситуационной сети (НСС) [3-6].

Ситуационный шаг управления представляется формулой:

$$S_{NET} : S_j \xrightarrow{U_k} S1_j \quad (1)$$

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);  $U_k$  – выбор маршрута в «непредвиденной ситуации» – выбор модели доставки (рис. 1).

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 вперёд. 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.



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

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 нечёткой ситуационной сети [3,4] основывается на определении связного подграфа, содержащего некоторое начальное состояние сети  $w'$ , относительно которого ведётся 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  $w_i, w_j ; \mu A(w_i, w_j)$  – значение функции принадлежности  $\mu A$  для ребра  $w_i, w_j$ .

Вид подграфа  $S_{NET}'$  определяется типом конкретной ситуационной сети:

-для сетей, в дугах переходов которых отсутствует случайная составляющая,  $S_{NET}'$  обычно принимает вид цепи (выполнение опорного плана);

-для сетей, учитывающих случайные факторы при переходах,  $S_{NET}'$

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  $\mu(j) = S_{NET} = \{S_{NET_1}, S_{NET_2}, \dots, S_{NET_b}, \dots, S_{NET_n}\}$ . 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 максиминной 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 [7,8].

### III. ОБРАБОТКА СОБЫТИЙ ИСПОЛНЯЮЩЕГО МОДУЛЯ ANYLOGIC.

1. Моделирование в AnyLogic представляет собой выполнение последовательности событийных и временных шагов [7]. 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. 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 сразу 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.

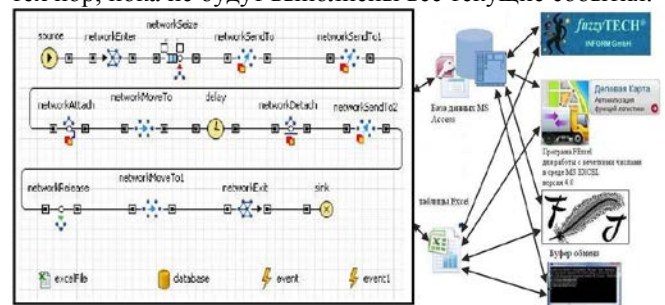


Рисунок 2. Обмен данными между элементами имитационной модели

2. В среде ExtendSim8 [9] 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.

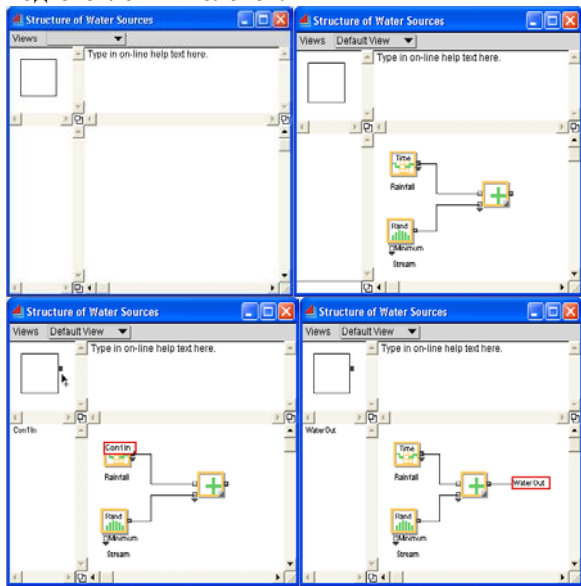


Рис. 3. Этапы разработки имитационной модели.



Рис.4. Реализации имитационной модели "Авиационная безопасность" в 3D.

3 Программа FuzzyTECH [10] 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. В интерактивном режиме программы *fuzzyTECH* [10] 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 нечёткого вывода в программу. 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).

Определяем (Marshrut) с тремя термами: «high», «middle» и «low» при трех входных переменных пропускная способность (Pspособnost), расстояние (Rastoynie) и время доставки (Time), получим набор правил. Логист для каждой переменной вводит вручную степень принадлежности к соответствующим термам. 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.

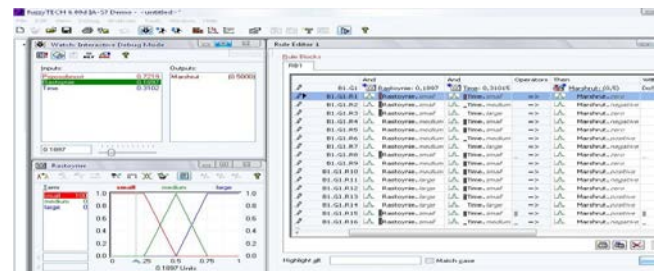


Рис. 5. Интерактивный режим программы FuzzyTECH.

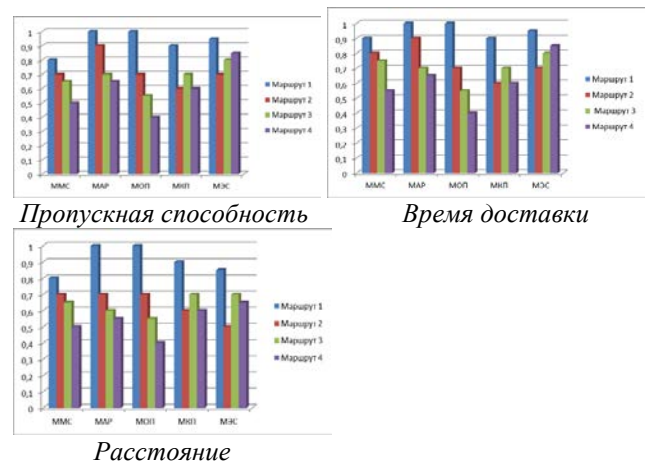


Рис. 6 Результаты

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы:

- 1) Методы принятия решений на нечетких моделях позволяют удобно и достаточно объективно производить оценку альтернатив по отдельным критериям. Добавление новых альтернатив не изменяет порядок ранее ранжированных наборов.
- 2) Методы, базирующиеся на разных подходах, дают различные результаты. Каждый подход имеет свои ограничения и особенности, и пользователь должен получить о них представление, прежде чем применять тот или иной метод принятия решений.
- 3) Большинство нечетких методов принятия решений показывает зависимость результатов от исходных данных (рис. 6-8). Несовпадение результатов, полученных разными методами, объясняется, с одной стороны, различными

способами представления экспертной информации, а с другой —различием подходов к принятию решений. Так, в основу метода анализа иерархий и модели компромиссного параметра заложен рационально-взвешенный подход, основанный на попарных сравнениях объектов и нормированных весовых коэффициентах. Максимальная свертка и модель основного параметра являются реализацией пессимистического подхода, игнорирующего хорошие стороны альтернатив, когда лучшей считается альтернатива, имеющая минимальные недостатки по всем критериям. К недостаткам модели эталонного сравнения относится требование большого объема входной информации.

В результате проделанной работы в фирме ООО «Норма ИС», разработаны ситуационные модели принятия оперативных решений на основных направлениях доставки для минимального времени окончания оставшихся работ, корректировке опорного плана и выборе нового маршрута доставки. Преимуществами данного подхода к моделированию и исследованию транспортных сетей в пакете AnyLogic является простота и наглядность построения сети, возможность расширения и усовершенствования модели пользователем. Время создания модели транспортной сети зависит от ее объема. Построение транспортных сетей и проведение несложных экспериментов с ними может быть выполнено даже не имеющим специальной подготовки пользователем.

Разработана ситуационная 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

$$S_{NET} : S_j \xrightarrow{U_k} S1_j$$

#### БИБЛИОГРАФИЯ

- 1.В.И. Горбулин, Р.А. Евдокимов, А.С. Фадеев. Обоснование стратегии развёртывания и восполнения орбитальных систем космических аппаратов на основе комплексной оптимизации управления организационно-технической системой/ Вопросы электромеханики Т. 128. 2012, с.35-40.
- 2.Е. А. Белоусова. Оптимизация управления транспортными потоками продукции ракетно-космического назначения/ Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» № 2/2014, с.66-70.
3. 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.
4. Фараонов А.В. Ситуационное моделирование как метод подготовки специалистов транспортной логистики и эффективности принятия решения /Труды пятой международной научно-практической

конференции «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» - «ИКМ МТМТС2019» // ISBN 978-5-902241-28-7 // АО «Центр технологии судостроения и судоремонта», Санкт-Петербург, 2019, с. 182-186.

5. Фараонов А.В. Ситуационное моделирование как метод подготовки специалистов в области принятия эффективных управленческих решений/Труды девятой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2019)/ISBN 978-5-91450-172-0. С. 249-252.

6. Фараонов А.В. Разработка ситуационной модели задачи маршрутизации при необходимости изменения опорного плана на основе нечёткой 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.

7. <http://www.anylogic.ru>. Экс Джей Текнолоджис, [www.xjtek.ru](http://www.xjtek.ru).

8. [www.ingit.ru](http://www.ingit.ru). Официальный сайт «Фирма «ИНТИТ», «Деловая карта».

9. Extend [http:// Extend@ фирмы Imagine That /](http://Extend@firmayimgine.com)

10. FuzzyTech <http://fuzzytech.com/>

# Decision making in management tasks transport streams of rocket and space technology based on a fuzzy situational network

A.V. Faraonov

**Abstract** — The transportation of space rocket products is an integral part of the technological process of preparing for the launch and launch of space rockets. Many years of experience in the field of rocket and space technology shows that the process of preparing space rockets and their components for their intended use at space centers remains a long and laborious process. This is due to the design features of modern space rockets and the technology of their preparation for launch. The high price for improper actions or the unskilled execution of technological operations for the transport support of rocket and space systems determines the high requirements for the level and quality of transport and logistics services. In this connection, the problem of scientific substantiation of the organization of the control system for the transport flows of rocket and space products arises. In [1,2], methods of ground-based logistic analysis based on optimization of a linear programming network were proposed. The situational model for making operational decisions during the transportation of space rocket products is considered as an integral part of the safe process of preparation for launch. The problem of multi-criteria selection of a new delivery route under uncertainty based on the theory of fuzzy sets is being solved. Alternatives to multiple routes are ranked and the best alternative to a new route based on fuzzy sets is selected.

**Key words**— Optimization of traffic management of space-rocket products, delivery routing, unforeseen situations, simulation, fuzzy situational networks.

## REFERENCES

- 1.V.I. Gorbulin, R.A. Evdokimov, A.S. Fadeev. Obosnovanie strategii razvjortyvanija i vospolnenija orbital'nyh sistem kosmicheskikh apparatov na osnove kompleksnoj optimizacii upravlenija organizacionno-tehnicheskij sistemoj/ Voprosy jelektromehaniki T. 128. 2012, s.35-40.
- 2.E. A. Belousova. Optimizacija upravlenija transportnymi potokami produkcii raketno-kosmicheskogo naznachenija/ Izvestija SPbGJeTU «LJeTI» # 2/2014, s.66-70.
3. Faraonov A.V. Optimizacija reshenij v zadachah upravlenija transportnymi potokami raketno-kosmicheskij tehniki // Mezhdunarodnyj nauchno-prakticheskij simpozium «Bezopasnost' kosmicheskikh poletov», 2019, SPb, 24–27 sentjabrja.
4. Faraonov A.V. Situacionnoe modelirovanie kak metod podgotovki specialistov transportnoj logistiki i jeffektivnosti prinjatija reshenija /Trudy pjatoj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskij konferencii «Imitacionnoe i kompleksnoe modelirovanie morskij tehniki i morskij transportnyh sistem» - «IKM MTMTS2019» // ISBN 978-5-902241-28-7 // AO «Centr tehnologii sudostroenija i sudoremonta», Sankt-Peterburg, 2019, s. 182-186.
- 5 Faraonov A.V. Situacionnoe modelirovanie kak metod podgotovki specialistov v oblasti prinjatija jeffektivnyh upravlencheskij reshenij/Trudy devjatoj vsrossijskij nauchno-prakticheskij konferencii po imitacionnomu modelirovaniju i ego primeneniju v nauke i promyslennosti «Imitacionnoe modelirovanie. Teorija i praktika» (IMMOD-2019)/ISBN 978-5-91450-172-0. S. 249-252.
6. Faraonov A.V. Razrabotka situacionnoj modeli zadachi marshrutizacii pri neobchodimosti izmenenija opornogo plana na osnove nechjotkoj situacionnoj seti. // V kn.: XII Vserossijskoe soveshhanie po problemam upravlenija. VSPU-2014. Moskva, 16-19 ijunja 2014 g.: Trudy

- [Jelektronnyj resurs]. M.: Institut problem upravlenija im. V.A. Trapeznikova RAN, 2014.S.5101-5113.
7. <http://www.anylogic.ru>. Jeks Dzhej Teknologdzhis», [www.xjtek.ru](http://www.xjtek.ru).
8. [www.ingit.ru](http://www.ingit.ru). Oficial'nyj sajt «Firma «INTIT», «Delovaja karta».
9. Extend [http:// Extend@ firmy Imagine That /](http://Extend@firmyImagineThat/)
10. FuzzyTexch <http://fuzzytech.com/>