

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, СВЯЗАННЫХ С ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ МКС

**А.М. Колосов (Санкт-Петербург)**

В настоящее время наблюдается активное освоение космического пространства в интересах решения многочисленных актуальных прикладных задач, возникающих в строительстве, на транспорте, сельском хозяйстве и других направлениях. С этой целью как в России, так и в других странах, запускаются и интенсивно используются различные классы космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли, КА связи и навигации, метеорологических и геодезических КА.

Важную роль в освоении космоса играет международная космическая станция (МКС), ее экипажем решается широкий спектр научных и практических задач, необходимых для более глубокого понимания космических процессов. Для долговременного устойчивого функционирования МКС необходимо постоянное пополнение материальных и энергетических ресурсов, а также периодическая смена экипажа станции. Для этого с Земли запускаются пилотируемые космические аппараты (ПКА), а также транспортные грузовые корабли (ТГК). При этом запуски последнего класса ТГК в течение нескольких лет имеют массовый характер и активно финансируются не только государством, но и частными компаниями, а само их содержание может интерпретироваться как процесс выполнения специальных транспортно-логистических операций (ТЛО), связанных с компоновкой и погрузкой полезной нагрузки (ПН) на борт очередного ТГК, его запуска, полета до МКС, стыковкой с ней и разгрузкой ПН, совместным полетом с МКС, перегрузкой отправляемой на Землю ПН (например, отработавшей научной аппаратуры), доставкой указанной ПН на Землю.

В связи с этим все более важным становится вопрос анализа процесса доставки грузов ТГК к МКС и того, какие факторы влияют на это в большей или меньшей степени. Для того чтобы проанализировать весь комплекс ТЛО, была создана имитационная модель, которая включает в себя все имеющихся пространственно-временные, технические и технологические операции, а также учитывает возможность отказа систем на различных этапах полета ТГК к МКС [7].

### **Описание имитационной модели**

Процесс моделирования начинается с поступления грузов на пусковую площадку. В данной модели возможные разновидности грузов были ограничены пятью группами: топливо, продукты, оборудование, вода, кислород. Для сглаживания неравномерности доставки грузов на пусковую площадку у каждой из групп имеется «буферная зона», куда они доставляются и где ожидают своей очереди на загрузку в ТГК. Для упрощения модели ёмкость грузового отсека ТГК ограничена 25 элементами (по пять элементов на каждую из групп), доступными для заполнения. Вопрос планирования грузопотока от склада до космодрома не входит в рассматриваемую модель, так как данный процесс неоднократно исследовался [1–6] и является условно безотказным.

После того как все грузы доставлены на пусковую площадку космодрома, следует процесс их погрузки на ТГК. Заполнение грузовых отсеков занимает от 300 до 900 мин, на данном этапе возможна задержка в 10–120 мин, вероятность её возникновения составляет 5%. Далее следует запуск ракетносителя. Он занимает от 8,97 до 9,03 мин, запуск также может быть отложен с вероятностью в 1% либо, с вероятностью 0,3%, возможно крушение РН и ТГК.

Моделирование процесса полета ТГК от запуска РН до момента стыковки, содержит такие параметры, как: время нахождения на орбите (от 1750 до 1850 минут); вероятность корректировки траектории (10%) и время, необходимое на её осуществление (от 50 до 150 мин); вероятность схода с маршрута полета (1%); время, затрачиваемое на сближение ТГК с МКС (от 96 до 110 мин); вероятность (8%) и время задержки при стыковке (30–1440 мин); вероятность крушения ТГК в процессе стыковки (0,84%).

Состыковавшись с МКС, ТГК находится на орбите земли от 1000 до 2000 мин, после чего он должен отстыковаться от МКС (возможная задержка при отстыковке составляет от 30 до 1440 мин) и вернуться на Землю.

### **Создание имитационной модели в AnyLogic**

Для создания имитационной модели был использован AnyLogic. В процессе моделирования рассматривались три возможных сценария полета ТГК к МКС: стандартный, пессимистический и оптимистический. Каждый из сценариев структурно и хронологически соответствует друг другу, основными отличиями являются вероятности: задержки при запуске и крушения при взлете, корректировки траектории и схода с маршрута, задержки и крушения при стыковке.

Вероятности данных событий в стандартном сценарии соответствуют значениям, указанным выше.

В пессимистическом сценарии вероятность возникновения данных событий увеличивается, так шанс возникновения задержки при запуске и крушения при взлете составит 2% и 0,7%; вероятность корректировки траектории и схода с маршрута возрастет до 15% и 2%; а возможность задержки и крушения при стыковке будет равна 12% и 1,5%.

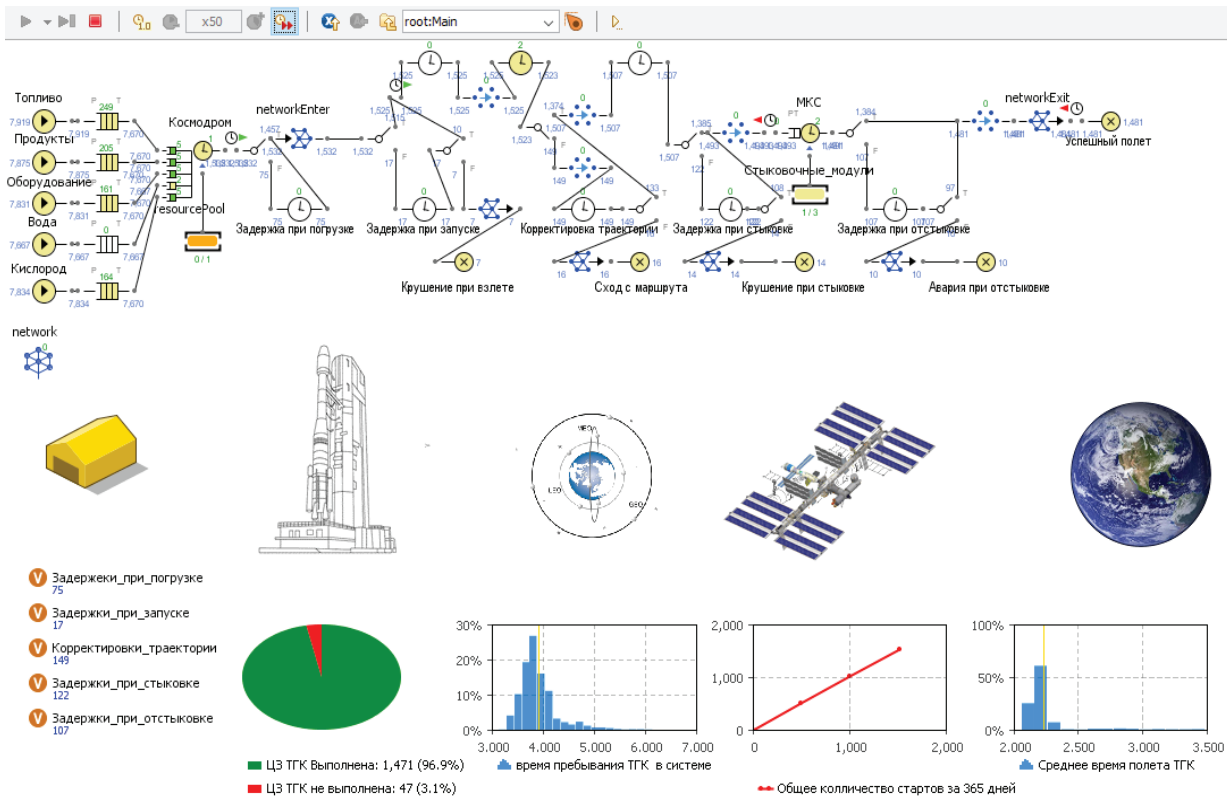
В оптимистическом сценарии данные вероятности, наоборот, имеют более низкие значения по сравнению со стандартным и пессимистическим сценариями. Шанс возникновения задержки при запуске и крушения будет равен 0,5% и 0,15%; вероятность корректировки траектории и схода с маршрута составит 6% и 0,7%; а возможность задержки и крушения при стыковке снизится до 5% и 0,5%.

В каждом из трех сценариев, однако, остаются неизменными такие параметры, как вероятность задержки при погрузке и отстыковке и аварии при отстыковке, так как они не влияют на выполнение или невыполнение целевой задачи и имеют низкую вероятность возникновения.

### **Результаты моделирования**

На основе данных, описанных в предыдущих разделах, была создана модель в AnyLogic. Модель содержит как элементы имитационного моделирования, так и элементы анимации.

Модельное время задавалось в минутах. Период моделирования был ограничен промежутком времени в 3 года (1576800 мин). Результаты моделирования были получены для трех сценариев: стандартного, пессимистического и оптимистического.



### Результаты моделирования в AnyLogic (стандартный сценарий)

Полученные результаты показывают, что целевая задача (ЦЗ) в стандартном сценарии моделирования была выполнена в 96,9% случаев, вероятность «провала» при выполнении ЦЗ составила 3,1% (рисунок).

В пессимистическом сценарии вероятность «успеха» составила 95,4%, неудачи 4,6%. Отклонение по количеству кораблей в пессимистическом сценарии по сравнению со стандартным составило 1,25%.

В оптимистическом сценарии вероятность выполнения ЦЗ оказалась равна 97,7%, невыполнения 2,3%. По сравнению со стандартным сценарием, отклонение по количеству ТКГ составило 0,8%, с пессимистическим 0,4%. В целом отклонение по количеству запущенных кораблей между тремя сценариями составило около 1%, что говорит о сопоставимости полученных результатов.

При сравнении оптимистического сценария со стандартным, количество успешных полетов возросло на 0,8%. При этом количество задержек при запуске сократилось на 340%, количество корректировок траектории и задержек при стыковке уменьшилось на 54,36% и 33,6%, среднее время полета ТКГ практически не изменилось и составило около 2300 мин.

При сравнении пессимистического и стандартного сценариев видно, что вероятность провала выполнения целевой задачи возросла на 1,5%, количество задержек при запуске увеличилось на 58,82%, а вероятность корректировки траектории выросла на 69,13%, как и вероятность задержки при стыковке, которая возросла на 46,72%. Среднее время пребывания ТКГ в системе увеличилось с 3800 до 3900 мин, среднее время полета при этом не изменилось, однако возросло общее количество отклонений.

Из данных результатов видно, что нет прямой зависимости между уменьшением (увеличением) количества нестандартных ситуаций и повышением (снижением) вероятности выполнения целевой задачи полетов.

### Заключение

Результаты моделирования показывают, что нет прямой зависимости между уменьшением (увеличением) количества нестандартных ситуаций и повышением (снижением) вероятности выполнения целевой задачи полетов. Так, даже при существенном сокращении (росте) количества отклонений (по отдельным показателям отклонение составило более 50%) общая вероятность выполнения ЦЗ значительно не изменилась (отклонение от стандартного сценария 0,8–1,5%), что говорит о наличии ряда других факторов, которые также влияют на выполнение ЦЗ, но не были учтены в данной работе. Дальнейшая разработка данной проблемы предполагает поиск, анализ таких факторов и добавление их в уже существующую имитационную модель. Данная модель позволяет с высокой степенью достоверности прогнозировать вероятность возникновения нештатных ситуаций на каждом из этапов полета космического корабля, что может быть использовано для предотвращения таких ситуаций при подготовке полетов реальных космических аппаратов.

### Литература

1. **Бидеев А.Г. и др.** Метод адаптивного планирования грузопотока в интерактивной мультиагентной системе расчета программы полета, грузопотока и ресурсов российского сегмента международной космической станции / А.Г. Бидеев, В.П. Карбовничий, И.В. Майоров, А.Л. Новиков, П.О. Скобелев, М.В. Сычева // Космическая техника и технологии. 2014. № 1 (4). С. 29–39.
2. **Лахин О.И.** Анализ событий адаптивного планирования грузопотока российского сегмента международной космической станции // Информационно-управляющие системы. 2015. № 6. С. 19–27.
3. **Лахин О.И.** Особенности постановки задачи планирования программы полета и грузопотока Российского сегмента Международной космической станции // Вестник Самарского гос. технического университета. Сер. «Технические науки». 2015. № 3 (47). С. 32–46.
4. **Лахин О.И.** Особенности реализации интерактивной мультиагентной системы построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов Российского сегмента Международной космической станции // Мехатр-ка, автоматизация, управление. 2016. Т. 17. №1. С. 42–46.
5. **Легостаев В.П. и др.** Создание и развитие систем управления движением транспортных космических кораблей «Союз» и «Прогресс»: опыт эксплуатации, планируемая модернизация / В.П. Легостаев, Е.А. Микрин, Я.В. Орловский, Ю.Н. Борисенко, В.Н. Платонов, С.Н. Евдокимов // Труды МФТИ. 2009. Т. 1, № 3. С. 8.
6. **Майоров И.В.** Реализация мультиагентной платформы планирования ресурсов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 1. С. 37–41.
7. **Соколов Б.В., Колосов А. М.** Планирование транспортно-логистических операций в космосе // Материалы XVI Международной научно-практической конференции «логистика: современные тенденции развития», 6-7 апреля 2017 года.