

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ГРАФИКА ПОДГОТОВКИ РАКЕТЫ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Щербина И.С.¹, Трудов А.В.¹, Решетников Д.В.¹

¹ФГКВОУ ВПО "Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского" Министерства обороны Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: ispytatel1977@mail.ru

В предлагаемой статье проведен краткий анализ особенностей методов сетевого планирования традиционно используемых в практике управления комплексом технологических операций выполняемых в процессе эксплуатации технологического оборудования стартового комплекса. Одним из существенных недостатков рассмотренных методов является то, что эти методы не предусматривают необходимость изменения последовательности выполнения работ. Кроме того, наличие случайных событий, времена наступления которых, как правило, описываются различными законами распределения, циклических процессов, обусловленных особенностями проведения испытаний, являются причинами того, что исследование его аналитическими методами сопряжено со значительными трудностями. Авторы предлагают использовать для исследования технологических процессов протекающих при подготовке ракеты космического назначения на стартовом комплексе методы имитационного моделирования. На примере фрагмента технологического графика подготовки авторами разработана сетевая модель процесса. Модель реализована в системе имитационного моделирования AnyLogic, объединяющей в себе различные подходы к имитации функционирования систем – дискретно-событийный, агентный и метод системной динамики. Разработанная модель позволяет получать различную статистическую информацию и управлять параметрами системы в реальном масштабе времени.

Ключевые слова: сетевое планирование, имитационная модель, технологический график подготовки, стратегия обслуживания.

THE SIMULATION MODEL OF THE LAUNCH COMPLEX FACILITY OPERATING SYSTEM

Scherbina I.S.¹, Trudov A.V.¹, Reshetnikov D.V.¹

¹Mozhaisky Military Space academy, St.Petersburg, Russia, ispytatel1977@mail.ru

The article deal with the network planning and control methods traditionally used in practice of control of the technological operation performed at the launch facility equipment. One of the significant drawback of the methods being analyzed is inability of changing of the operations sequence. Besides that, random events described by different distribution functions, many cycling processes caused by failures analysis are the reasons that the analytical methods of these processes modelling fraught with significant difficulty. The authors of the article propose the simulation methodology to use for the launch facility technological processes investigation. For example, in the article the simulation model of the technological graph fragment is developed. This model is designed by the AnyLogic multimethod simulation system, combined several approaches to systems simulation – system dynamics, process-centric (discrete event), and agent based modeling. The model developed allows to gather the statistical information about the systems functioning and to control of the system parameters in real time.

Keywords: mathematical modeling, simulation model, launch complex ground facilities, maintenance policy.

Сетевое планирование, как известно, является одной из форм графического отображения совокупности работ, описывающей различные их характеристики, например, взаимосвязь, продолжительность, трудоемкость и позволяющей разрабатывать модели создания сложных производственных систем, выполнения комплекса технологических процессов, в том числе и при подготовке и пуске ракет космического назначения. Сетевые модели технологических процессов получили широкое применение в практике планирования различных работ достаточно давно – с середины 50-х годов прошлого века. Наиболее известными методами

сетевого планирования, используемыми для планирования комплекса операций технологического графика подготовки элементов ракетно-космического комплекса к использованию по назначению до сих пор остаются методы СРМ – метод критического пути и PERT, известный как метод оценки и анализа программ. Характерными особенностями которых является то, что эти методы не предусматривают возможности изменения структуры самой сети, необходимость в которой обуславливают процессы, достаточно часто встречающиеся на практике - изменение технологии выполнения комплекса работ, процессы поиска и устранения отказов и т.д.

Таким образом, в практике приходится учитывать случайные процессы, протекающие в системе эксплуатации, связанные с отказами технологического и бортового оборудования, технических систем и ошибками эксплуатирующего персонала. Состояние оборудования изменяется в процессе работы и зависит как от алгоритмов его функционирования, так и возникновения случайных и детерминированных событий, происходящих внутри системы и вне нее [2].

Процесс подготовки ракеты космического назначения (РКН) к запуску характеризуется значительным количеством операций, причем как показывает практика, в ряде случаев, случайным может быть не только время выполнения операции, но их последовательность, что свидетельствует об изменении структуры исходного сетевого графика. Такое возможно, как правило, при задержках в выполнении комплекса работ, вызванных поиском и устранением неисправностей, повтором операций и т.д. В этих условиях целесообразно использовать альтернативный метод сетевого планирования – метод графической оценки и анализа (GERT), позволяющий более адекватно задавать сложные технологические процессы в тех случаях, когда затруднительно или невозможно однозначно определить, какие именно работы и в какой последовательности должны быть выполнены для завершения всего комплекса операций. Однако наличие в структуре технологического графика подготовки и пуска большого количества случайных событий, времена наступления которых, как правило, описываются различными законами распределения, циклических процессов, обусловленных особенностями проведения испытаний, являются причинами того, что исследование его аналитическими методами сопряжено со значительными трудностями. Одним из выходов из сложившейся ситуации является использование методов имитационного моделирования, нашедших широкое применение для описания функционирования сложных организационно-технических систем и технологических процессов.

В имитационном моделировании практическое применение получили три подхода – дискретно-событийное моделирование, агентное моделирование и метод системной динамики. Наиболее адекватным и отражающим особенности моделируемых процессов для создания имитационной модели технологического графика подготовки РКН является метод дискретно-событийного моделирования, в рамках которого последовательность

изменяющихся состояний РКН и операций, выполняемых для между ними, задается некой структурой – технологическим графиком, представляющим собой ориентированный граф. Элементами такого графа являются выполняемые операции, события и пути. При этом время выполнения операций в общем случае является случайной величиной, описываемой треугольным распределением, а события соответствуют окончанию выполнения определенной операции технологического графика.

Имитационная модель воспроизводит процесс подготовки РКН к запуску с учетом случайных факторов – отказов оборудования и ошибок эксплуатирующего персонала и позволяет реализовать многократные машинные прогоны модели с разными исходными данными [3]. Рассмотрим процесс разработки имитационной модели технологического графика подготовки РКН легкого класса к запуску.

Процесс последовательной разработки имитационных моделей начинается с создания простой модели, которая постепенно усложняется в соответствии с требованиями, предъявляемыми к результату.

В каждом цикле имитационного моделирования, в общем, выделяют следующие этапы [5]:

1. Формулировка проблемы.
2. Разработка модели:
 - разработка концептуальной модели;
 - формализация построенной концептуальной модели.
3. Подготовка данных.
4. Трансляция модели.
5. Верификация.
6. Валидация.
7. Планирование.
8. Постановка экспериментов.
9. Анализ результатов.
10. Реализация и документирование.

Одним из самых важных этапов является разработка модели, подэтапом которого является формализация построенной концептуальной модели. Для формализации концептуальной модели выбрана система имитационного моделирования (СИМ) AnyLogic 7.2.1, являющаяся наиболее передовой и удобной по сравнению со своими аналогами. Процесс формализации концептуальной модели в СИМ AnyLogic 7.2.1 заключается в составлении из существующих уже разработанных блоков сетевой модели, на основе имеющихся исходных данных.

В рамках исследования разрабатывается имитационная модель сетевого технологического графика подготовки РКН легкого класса на стартовом комплексе (СК) [1],

исходными данными для которой являются:

- параметры законов распределения времени выполнения операций технологического графика;
- характеристики вероятностей появления нештатных ситуаций 1 типа при выполнении конкретных операций технологического графика, а также законов распределения времени на поиск и устранение этих нештатных ситуаций;
- составы боевых расчетов по видам наземного технологического оборудования;
- характеристики вероятностей появления нештатных ситуаций, обусловленных ошибкам эксплуатирующего персонала расчетов типа при выполнении работ, а также законов распределения времени на поиск и устранение этих нештатных ситуаций;
- составы расчетов для выполнения каждой операции технологического графика.

Среда моделирования в AnyLogic включает в себя: низкоуровневые конструкции моделирования (переменные, уравнения, параметры, события и т.п.), формы представления (линии, квадраты, овалы и т.п.), элементы анализа (базы данных, гистограммы, графики), стандартные картинки и формы экспериментов [4].

В AnyLogic основным структурным блоком при создании моделей являются классы активных объектов. Класс определяет шаблон, в соответствии с которым строятся отдельные экземпляры класса. Эти экземпляры могут быть определены как объекты других активных объектов. Каждый активный объект имеет структуру (совокупность включенных в него активных объектов и их связи), а также поведение, определяемое совокупностью переменных, параметров, стейтчартов и т. п.

Каждый экземпляр активного объекта в работающей модели имеет свое собственное поведение, он может иметь свои значения параметров, он функционирует независимо от других объектов, взаимодействуя с ними и с внешней средой.

AnyLogic использует объектно-ориентированный подход к представлению сложных систем. Этот подход позволяет простым и естественным образом организовать и представить структуру сложной системы с помощью иерархии абстракций. При построении модели используются средства визуальной разработки (введения состояний и переходов стейтчарта, введения пиктограмм переменных и т. п.), задания численных значений параметров, аналитических записей соотношений переменных и аналитических записей условий наступления событий. Основной парадигмой, принятой в AnyLogic при разработке моделей, является визуальное проектирование – построение с помощью графических объектов и пиктограмм иерархий структуры и поведения активных объектов.

AnyLogic является надстройкой над языком Java. Все объекты, определенные пользователем при разработке модели в AnyLogic с помощью его графического редактора, компилируются в конструкции языка Java, а затем происходит компиляция всей собранной программы на Java, задающей модель, в исполняемый код.

В AnyLogic приняты два режима выполнения моделей: режим виртуального времени и режим реального времени. В режиме виртуального времени процессор работает с максимальной скоростью без привязки к физическому времени. Этот режим используется для факторного анализа модели, набора статистики, оптимизации параметров модели и т. п.

Основными средствами порождения событий в модели являются таймеры и стейтчарты. Кроме базовых средств разработки дискретно-событийных систем, пользователю доступны библиотеки, в которых собраны высокоуровневые средства – блоки, позволяющие осуществлять моделирование широкого класса дискретно-событийных систем массового обслуживания без использования программного кода на основе применения заранее определенных блоков библиотеки.

Для составления имитационной модели технологического графика подготовки РКН использованы следующие блоки AnyLogic:

- Source – источник заявок.
- Delay – задерживает заявки на заданное время.
- Queue – моделирует очередь, он хранит поступающие заявки в определенном порядке.
- Service – занимает ресурсы для заявки, задерживает заявку, а затем освобождает занятые ей ресурсы.
- SelectOutput – принимает заявку, и затем, в зависимости от заданного условия, передает ее на один из двух выходных портов.
- Combine – дожидается поступления двух заявок в порты, а затем создает новую заявку и направляет ее на выходной порт.
- Split – создает заданное число копий каждой поступающей заявки и пересылает их дальше.
- ResourcePool – предоставляет ресурсы, которые могут быть заняты и освобождены заявками.
- Sink – уничтожает поступившие заявки.

Результатом составления сетевой модели является последовательность блоков и связей между ними, при которой создается логика поведения объекта в процессе перехода между состояниями. Такая последовательность называется диаграммой процесса.

В имитационной модели процесса приведения РКН легкого класса из Готовности 2 (от момента транспортировки на СК) до приведения в Готовность 1 состояние РКН изменяется в соответствии с сетевой моделью технологического графика. Блок «Source» создает заявку, тем самым инициирует исходное состояние РКН. Блок «Sink» уничтожает заявку, тем самым констатирует факт приведения РКН в конечное состояние, то есть приведения РКН в Готовность 1. Время прохождения заявки из блока «Source» в «Sink» является временем выполнения всего технологического графика.

«Исполнители» боевых расчетов в диаграмме процесса представлены как ресурсы с помощью блоков «ResourcePool». Количество ресурсов в блоках «БР1» – «БР31» соответствуют количеству «исполнителей» в соответствующем боевом расчете.

Каждая операция технологического графика представляется блоком «Service». Заявка, вошедшая в этот блок инициирует захват необходимых ресурсов из блоков «ResourcePool» на заданное время, по окончании которого захваченные ресурсы высвобождаются. Таким образом, захватываемые ресурсы – «исполнители» из состава соответствующего боевого расчета, а заданное время – время выполнения операции технологического графика, которое определяется в соответствии с используемым законом распределения.

Для организации параллельного выполнения операций технологического графика с помощью блока «Split» создаются две одинаковые заявки, расходящиеся по двум параллельным ветвям прохождения блоков «Service».

Для организации завершения параллельного выполнения операций технологического графика используется блок «Combine», который дожидается поступления двух заявок, идущих по двум параллельным ветвям прохождения блоков «Service», а затем создает новую заявку и направляет дальше по диаграмме процесса.

Для организации процесса появления нештатных ситуаций, вызванных отказом технологического оборудования, используется блок «SelectOutput». Блок располагается после операции контроля, то есть после блока «Service», и имеет два выхода «true» и «false». Вероятность появления нештатной ситуаций для данной операции задает вероятность выбора одного из двух выходов. При появлении нештатной ситуации, обусловленной отказом технологического оборудования, заявка через выход «false» направляется в блок «Service», имитирующий процесс поиска и устранения неисправности, где заново происходит захват необходимых ресурсов на заданное время. После заявка направляется обратно в блока «Service», для имитации повтора неудачной операции технологического графика. Если подобная нештатная ситуация не появляется, то заявка выходит через выход «true» и продолжает движение по диаграмме процесса.

Для организации процесса появления нештатных ситуаций, обусловленных ошибками эксплуатирующего персонала, используются свойства блоков «ResourcePool» имитирующих соответствующие боевые расчеты. Таким свойством блока «ResourcePool» является возможность задания «аварий», при которой все ресурсы блока «ResourcePool» изымаются на определенное время (время устранения аварии) из диаграммы процесса. Таким образом, момент появления «аварий», то есть нештатной ситуации, определяется с заданной вероятностью перед началом операций технологического графика. Соответственно, время устранения аварии имитирует время поиска и устранения нештатной ситуации. Пока не закончится это время ни один из блоков «Service», имитирующих операции технологического графика с использованием «исполнителей» этого боевого расчета, не будет

работать. По окончании поиска и устранения нештатной ситуации, ресурсы освобождаются и блоки «Service», имитирующие операции технологического графика с использованием «исполнителей» этого боевого расчета, продолжают работать.

Для сбора, обобщения и анализа информации о работах блоков «Service» и «ResourcePool» используются объекты «Статистика», которые сохраняют и вычисляют статистическую информацию (среднее значение, минимум, максимум и т.д.) для последовательности измеренных значений.

Одно выполнение технологического графика является одним прогоном имитационной модели.

Участок технологического графика перерода РКН из Готовности 2 (от момента транспортировки на СК) в Готовность 1 и соответствующие ему фрагменты сетевой модели и имитационной модели в AnyLogic приведены на рис. 1, 2 и 3.

Для удобства все исходные данные и все результаты расположены в подключенном к имитационной модели файле Excel. На первом листе книги файла исходных данных содержатся данные об операциях технологического графика. На втором листе содержатся данные о составах расчетах. На третьем листе содержатся данные о распределении исполнителей из состава расчетов по операциям технологического графика.

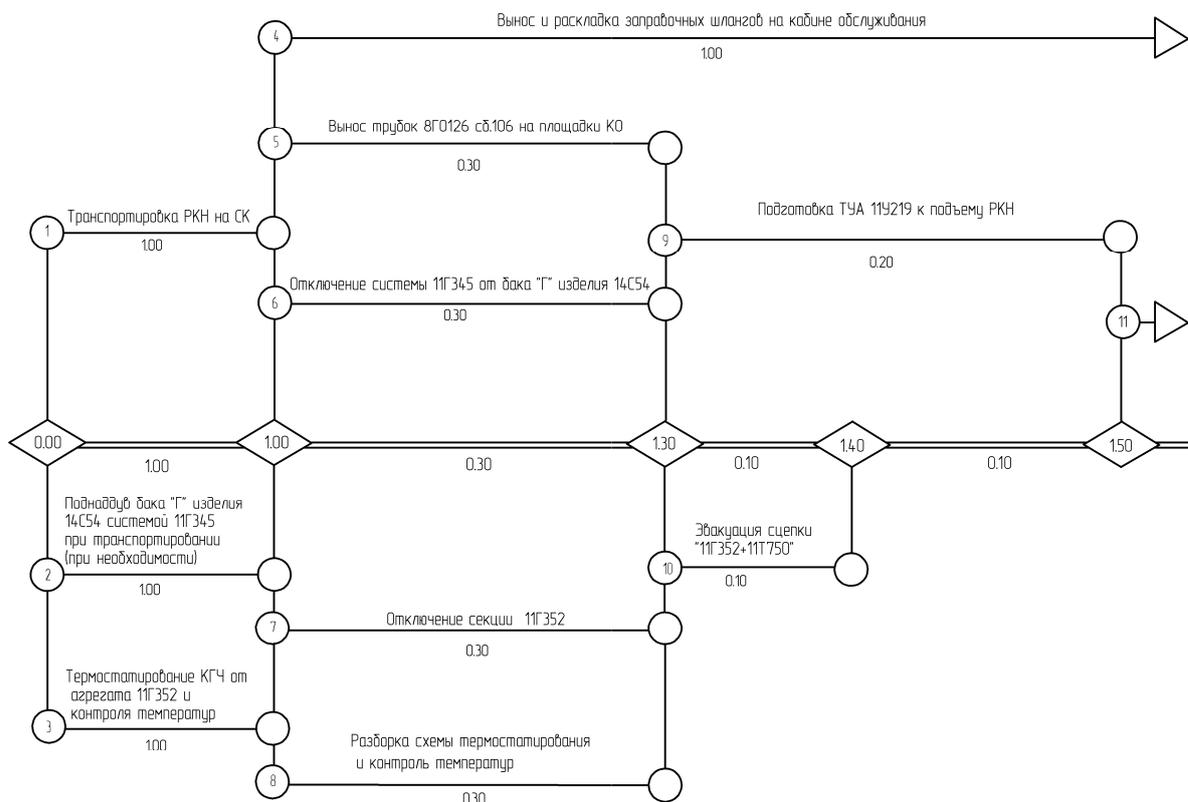


Рисунок 1 – Фрагмент технологического графика.

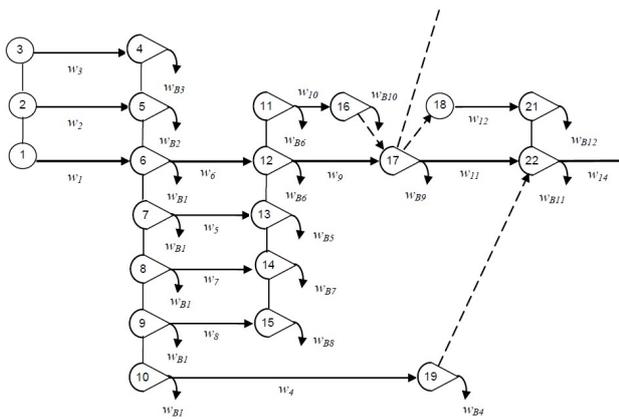


Рисунок 2 – Фрагмент сетевой модели

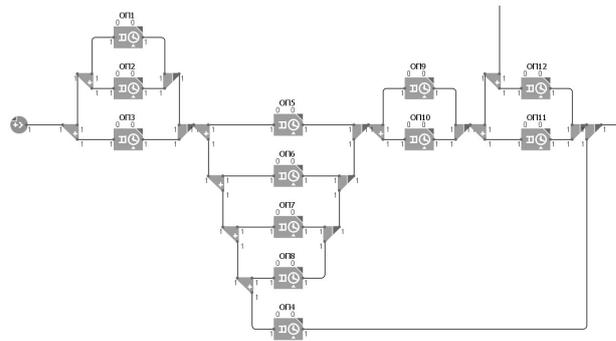


Рисунок 3 – Фрагмент имитационной модели в СИМ AnyLogic

В заключение отметим, что для разработки имитационных моделей могут быть использованы различные языки программирования и прикладные программные комплексы. Подобные задачи уже решались авторами с использованием широко известной системы имитационного моделирования GPSS World, требующей, тем не менее достаточно глубокого знания системы команд и логики работы программы. Кроме того, GPSS World записи программного кода «в ручную» и не содержит в себе другие методы имитационного моделирования. Выбор системы имитационного моделирования AnyLogic был обусловлен возможностью интерактивной работы с создаваемой моделью с использованием большого количества встроенных блоков, различными типами доступных экспериментов и встроенным в систему инструментами агентного моделирования и моделирования методами системной динамики.

Список литературы

1. АДИС.372.182.001 ИЭ35 – технологический график подготовки и пуска РКН 14А15 с РБ и КА.
2. Бражник А.Н. Имитационное моделирование: возможности GPSS World. – СПб.: Реноме, 2006. – 439 с.
3. Жизненный цикл и эксплуатационное качество космических средств: учеб./ В.И.Звягин, Г.Д.Петров, А.И.Птушкин и др. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010. – 320 с.
4. Коровин А.М. Моделирование систем: учебное пособие к лабораторным работам. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – 47 с.
5. Методика оценки временных показателей готовностей РКН 14К35 с РН 14А15.

Рецензенты:

Петров Г.Д., д.т.н., профессор, начальник кафедры, ВКА имени А.Ф.Можайского, г.Санкт-Петербург.

Козлов В.В., д.т.н., профессор, профессор кафедры, ВКА имени А.Ф.Можайского, г.Санкт-Петербург.