

## АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ИМИТАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РАКЕТНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

*Филяев Михаил Петрович, профессор кафедры информационных систем и технологий СПбГЛТУ им.С.М.Кирова, дтн*  
*Воробьев Альберт Анатольевич, ведущий научный сотрудник лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании СПИИРАН, дтн, снс*

Эффективность применения ракетного вооружения и ракетной техники определяется своевременностью, полнотой и качеством проведения мероприятий по обеспечению войск ракетами, накоплению до установленных норм их запасов и запасов боевых частей, содержанию в установленных степенях готовности, решению задач эксплуатации и восстановления ракетной техники. В комплексе с технической и специальной подготовкой личного состава, обеспечивающей безотказность действий и безопасность обращения с ракетным вооружением, эти мероприятия составляют основу ракетно-технического обеспечения (РТО). Результаты анализа структуры и специфики процессов РТО свидетельствуют о том, что большинство из них в той или иной степени носит логистический характер.

В наиболее общем плане логистика сегодня рассматривается как наука об оптимальном управлении потоками, является весьма востребованной и актуальной. Различные виды логистики находят применение практически во всех сферах человеческой деятельности. Логистический подход и принципы позволяют значительно снизить издержки, связанные с управлением самых разнообразных потоков: материальных ресурсов, информации, транспорта и многого другого. Логистика позволяет сделать планирование и управление потоковыми процессами более упорядоченным, эффективным и системным. Особую роль в современных условиях логистика как наука приобретает в сфере обороны и безопасности государства и является одним из основных факторов, определяющих как эффективность функционирования оборонно-промышленного комплекса, так и эффективность применения войск в операциях (боевых действиях), что обуславливается их снабжением и всесторонним обеспечением, так называемой военной логистикой [1].

Ракетно-техническое обеспечение как составная часть военной логистики включает ряд процессов, которые в свою очередь по функциональным признакам можно сопоставить с другими видами логистики. Аналогично предложенной в работе [2] классификации логистики по функциональным признакам в РТО возможно выделить процессы, связанные с логистикой распределения, логистикой склада, логистикой запасов, транспортной логистикой. Отличительной особенностью рассматриваемых процессов РТО является комплексный характер логистических признаков, что не позволяет однозначно относить эти процессы только к одному из указанных видов логистики. Так, например, одной из важнейших функциональных задач технической ракетной базы (ТРБ) оперативного объединения является хранение и содержание запаса ракет, их подготовка и доставка в ракетные соединения и части, а также прием поступающих в объединение ракет и боевых частей к ним [3]. Условная схема процесса реализации этой функциональной задачи ТРБ представлена на рис. 1.

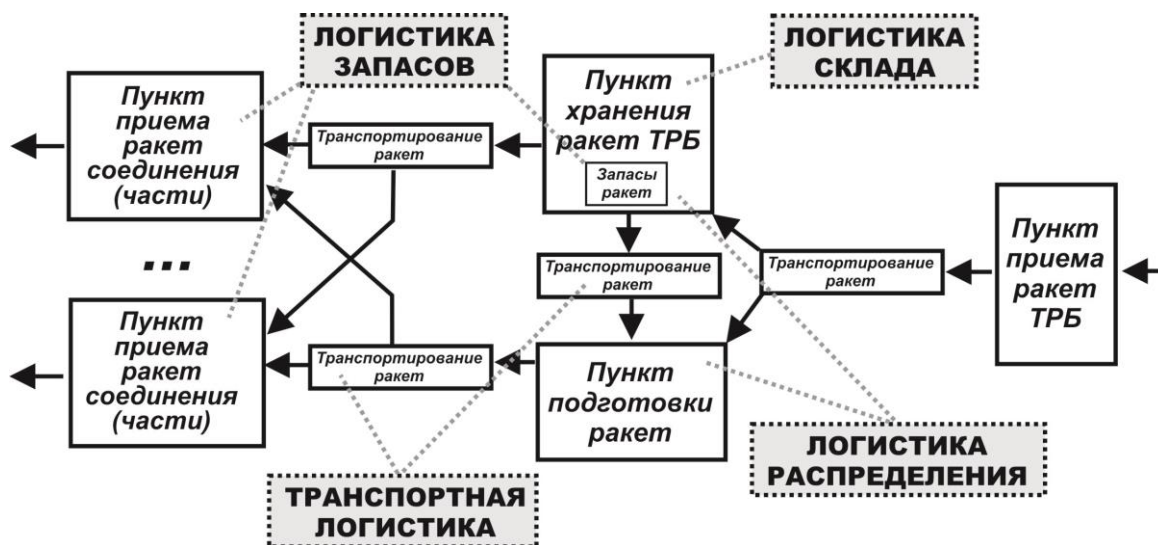


Рис.1. Условная схема процесса доставки ракет в ракетные соединения и части

Результаты анализа структуры рассматриваемого процесса свидетельствуют о многовариантности его реализации и сочетании при этом различных видов логистики. Таким образом, основные, наиболее сложные процессы РТО являются логистическими. Эти процессы должны быть в первую очередь устойчивыми, т.е. построены таким образом, чтобы в угрожаемый период и в военное время соединения и части обеспечивались ракетами с минимальными временными потерями, возникающими в результате воздействия противника на объекты, силы и средства РТО, а также транспортные коммуникации.

Наиболее эффективным инструментом исследования и оптимизации логистических процессов в настоящее время является математическое моделирование. В условиях стремительного развития информационных технологий роль и место математического моделирования многократно возрастает, так как благодаря применению современных компьютерных средств моделирования существенно снижается трудоемкость построения математических моделей и повышается оперативность получения и обработки результатов моделирования.

*Под математическим моделированием* понимается процесс установления соответствия данному реальному объекту некоторого математического объекта, называемого математической моделью. В логистике широко применяются два основных вида математического моделирования: аналитическое и имитационное.

*Аналитическое моделирование* логистических систем заключается в представлении их составных частей в виде формализованных математических описаний и установлении математических законов их взаимодействия. Аналитические модели служат для решения достаточно простых расчетных и оптимизационных задач, к достоинствам аналитического моделирования относится возможность обобщения и многократность использования. При усложнении логистических процессов исследование их аналитическими методами существенно затрудняется и во многих случаях становится практически невозможным

В этих условиях для исследования сложных процессов необходимо, наряду с традиционными аналитическими методами, использовать и *имитационное моделирование*, позволяющее описывать процессы, не допускающие явного формализованного описания. Имитационная модель по сути является логической или логико-математической моделью исследуемого процесса в виде алгоритма ее функционирования, программно-реализуемого на компьютере [4]. Таким образом, под имитационной моделью понимается отдельная программа (совокупность программ, программный комплекс), позволяющая с помощью последовательности вычислений по определенным операционным правилам воспроизводить (имитировать) процессы функционирования отдельного объекта или системы в целом при условии воздействия различных, как правило, случайных факторов.

При имитационном моделировании закономерности, определяющие характер количественных отношений внутри логистических систем, как правило исследуются не полностью, а до определенного уровня детализации. Отдельные части системы для исследователя остаются «черным ящиком». Определение условий, при которых результат удовлетворяет предъявляемым требованиям, является целью работы с имитационной моделью.

Основным достоинством имитационного моделирования является то, что этим методом можно решать сложные задачи, так как достаточно просто учитываются случайные воздействия и другие факторы, которые создают трудности при аналитическом исследовании. При этом решение задачи осуществляется путем прогона программы с заданными параметрами, тем самым и моделируется исследуемый процесс.

Имитационное моделирование имеет и ряд существенных недостатков, которые также необходимо учитывать при выборе метода моделирования.

Первым является то обстоятельство, что исследования с помощью этого метода весьма трудоемки. Для построения модели и экспериментирования на ней необходим высококвалифицированный специалист и большой ресурс машинного времени, поскольку метод основывается на статистических испытаниях и требует многочисленных прогонов программы. Имитационные модели разрабатываются для конкретных условий и, как правило, не тиражируются.

Вторым существенным недостатком является вероятность ложной имитации. Процессы в логистических системах носят вероятностный характер и поддаются моделированию только при введении определенного рода допущений, при этом при существенных упрощениях и ошибках в логике описания процессов, порядке их взаимодействия возникает проблема неадекватности результатов.

Таким образом, методология исследования логистических систем предполагает применение как аналитического, так и имитационного моделирования. Актуальной при этом является проблема выбора метода моделирования, так как достоинства и недостатки аналитического и имитационного моделирования являются фактически противоположными. Анализ известных современных реализаций этих методов при исследовании процессов рассмотренных выше видов логистики [5, 6] свидетельствует о преобладании выбора аналитического моделирования в случае логистики запасов и логистики распределения, имитационный метод наиболее востребован для исследования логистики склада и транспортной логистики. В связи с отмеченным выше сочетанием этих видов в логистических процессах РТО целесообразно рассмотреть вопрос о совместном применении имитационного и аналитического моделирования в данной предметной области, что будет содействовать интеграции функциональных областей логистики и повышению эффективности управления в целом.

Комбинированное (аналитико-имитационное) моделирование при исследовании логистических процессов позволяет объединить достоинства одного и другого методов. При построении комбинированных моделей, как принято в известных реализациях этого метода [7, 8], проводится предварительная декомпозиция процесса на составляющие подпроцессы и для тех из них, где это возможно, используются аналитические модели, а для остальных строятся имитационные. Такой подход не совсем однозначен, поскольку ставит на первое место применение аналитических методов и не позволяет использовать весомые преимущества имитационных моделей, придавая им второстепенное значение.

Тем не менее, в настоящее время вектор развития математического моделирования всё больше смещается в сторону имитационных методов, чему способствует создание и распространение инструментальных средств имитационного моделирования, таких, например, как программные среды AnyLogic, GPSS Studio [9]. В последнее время значительное внимание уделяется разработке и применению имитационных моделей и в военной области. Поэтому в отношении логистических процессов РТО более перспективным выглядит развитие комбинированного имитационно-аналитического моделирования, что в свою очередь требует решения ряда актуальных основополагающих вопросов.

**Анализ исходных данных и условий постановки задачи.** Задание исходных данных моделируемого процесса в виде усредненных значений и не высокие требования к точности определяемых параметров процесса не всегда предполагает использование аналитических методов, даже если структура процесса не является сложной. Рассмотрим процесс транспортирования, схема которого представлена на рис.2.

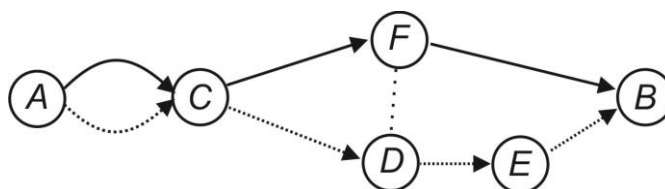


Рис. 2. Схема процесса транспортирования

Рассматривается транспортирование  $N$  транспортными средствами из пункта  $A$  в пункт  $B$ . Транспортирование осуществляется по двум маршрутам, обозначенным соответственно сплошными и пунктирными стрелками, требуется минимизировать время транспортирования, которое фиксируется по прибытию последнего транспортного средства в пункт  $B$ . Исходные данные заданы в виде усредненных значений, время окончания транспортирования по  $j$ -му маршруту определяется по формуле

$$T_j = \frac{L_j}{V_j} + \frac{N_j - 1}{n_j},$$

где  $L_j$  – протяженность  $j$ -го маршрута;  $V_j$  – средняя скорость движения транспортных средств по  $j$ -му маршруту;  $n_j$  – средний темп транспортирования по  $j$ -му маршруту.

Очевидно, что в такой постановке рассматриваемая задача без особого труда может быть решена аналитическим методом, определено минимальное время транспортирования и соответствующее ему распределение транспортных средств по маршрутам. Соответствующая имитационная модель в программной среде AnyLogic также обеспечила поиск решения, при этом результаты, полученные разными методами, фактически совпали. Небольшое расхождение обусловлено разницей в протяженности маршрутов, которая в имитационной модели определялась на основе информации ГИС. Тем не менее, имитационное моделирование обеспечило дополнительные возможности по исследованию транспортного процесса. Во-первых, использование стохастических значений скорости транспортных средств и темпа перевозки на отдельных участках позволяет получить более приближенные к реальному процессу результаты моделирования. Во-вторых, имитационная модель обеспечивает возможность исследования устойчивости моделируемого процесса к внешним воздействиям, что аналитическим методом в этом случае сделать значительно сложнее. Вопрос об исследовании устойчивости актуален при наличии уязвимости логистического процесса, рассмотренной в работе [10].

Предположим, что в процессе транспортирования возможно возникновение барьерного рубежа (пункт  $E$ ), как показано на рис.3.

Барьерный рубеж может быть обусловлен, например, разрушением транспортной коммуникации, что делает дальнейшее движение по соответствующему маршруту невозможным. Для завершения транспортирования выполняется возвращение транспортных средств, не пересекших барьерный рубеж, в пункт  $D$  и далее переход на другой маршрут. Имитационная модель в данной ситуации становится эффективным инструментом исследования зависимости времени окончания транспортного процесса от времени возникновения барьерного рубежа. Даже при усредненных значениях исходных данных модели значение времени окончания транспортирования приобретает случайный характер.

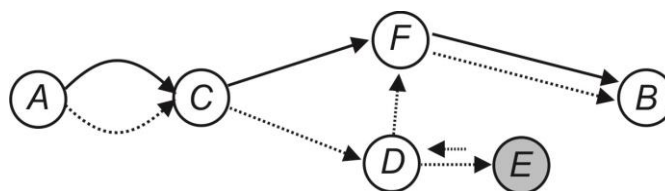


Рис. 3. Изменение схемы процесса транспортирования при возникновении барьерного рубежа

Таким образом, условия постановки задачи оказывают существенное значение на выбор метода моделирования логистического процесса.

**Выбор уровня детализации моделируемого процесса.** Этот вопрос не менее актуален, если рассматривать моделирование как пошаговый процесс от минимального до максимально возможного уровня детализации.

Моделирование логистических процессов РТО целесообразно рассматривать на аналогично предложенным в работе [11] системном, функциональном и операционном уровнях. При моделировании процессов на *системном уровне* осуществляется абстрагирование наиболее существенных характеристик процесса и создание упрощенного модельного отображения. Этот уровень детализации характеризуется сравнительно небольшим числом, как правило, усредненных параметров процесса, что обеспечивает возможность его моделирования аналитическим методом. Результаты моделирования, соответственно, также носят усредненный характер, их уточнение достигается дальнейшей детализацией логистического процесса.

На *функциональном уровне* проводится моделирование объектов подсистем и выполняемых ими функциональных задач с учетом существующих взаимосвязей. Это приводит к существенному возрастанию учитываемых параметров и усложняет их комплексный учет. Выбор метода моделирования в данном случае дополнительно зависит от специфики логистического процесса и может быть как аналитическим, так и имитационным.

*Операционный уровень* детализации предусматривает моделирование элементов объектов и операций, выполняемых ими для решения функциональной задачи. Сложность разработки комплексной аналитической модели при этом многократно возрастает ввиду необходимости учета большого числа параметров и определения зависимостей между ними. Имитационное моделирование позволяет решить эту проблему путем определения логики поведения и взаимодействия рассматриваемых элементов объектов и является более предпочтительным методом при операционном уровне детализации.

Применительно к логистическому процессу доставки ракет в соединения и части оперативного объединения рассмотренные уровни детализации представлены на рис.4.

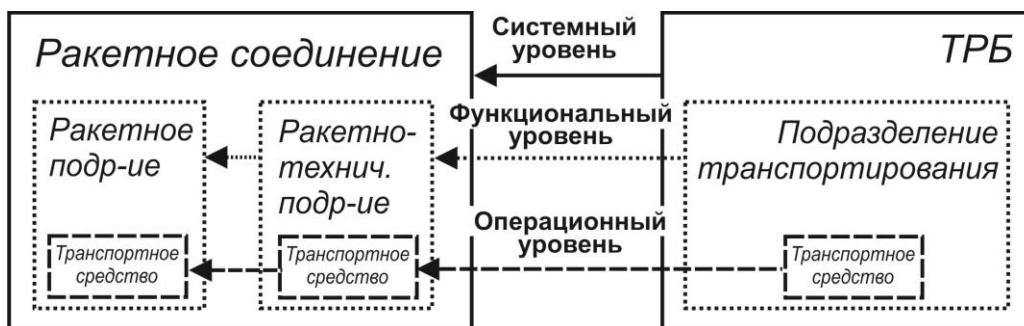


Рис.4. Уровни детализации моделирования процесса доставки ракет

Примером реализации технологии пошагового комбинированного моделирования является разработка моделей цепей поставок в программной среде AnyLogistix [12], где при проектировании новой цепи первоначальное возможное размещение распределительных центров сначала определяется аналитическим методом, а затем на основе повышения уровня детализации выполняется имитационное моделирование, по результатам которого вносятся корректировки с целью оптимизации процесса.

**Выбор варианта декомпозиции моделируемого процесса.** Декомпозиция (разбиение на части, этапы реализации во времени) логистического процесса является определяющим условием построения его модели комбинированным методом. При этом в зависимости от исходных данных и условий постановки задачи одни и те же этапы могут представляться с различным уровнем детализации.

Применительно к функциональной задаче доставки ракет в ракетные соединения декомпозиция соответствующего процесса может быть выполнена как, например, представлено на рис.5.

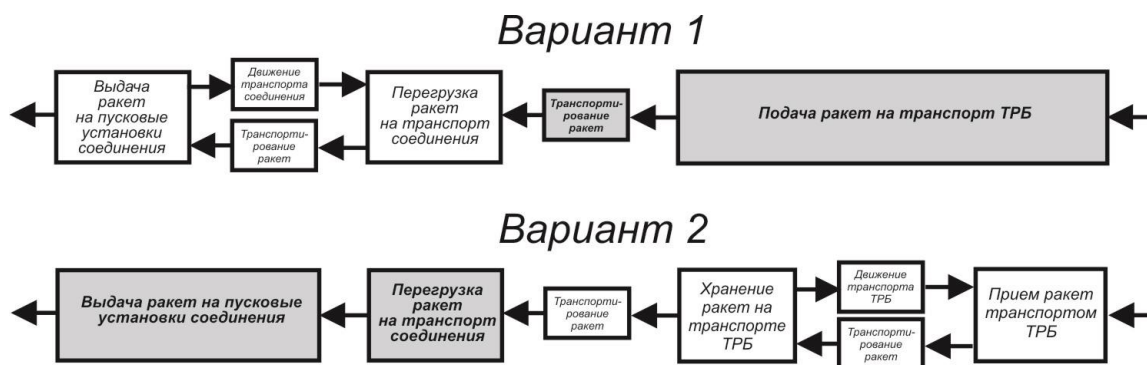


Рис.5. Варианты декомпозиции процесса доставки ракет

В первом варианте моделирование этапов подачи ракет из арсенала в ТРБ и их транспортирование в пункт передачи на транспорт соединения предполагает функциональный уровень детализации и может быть выполнено по усредненным значениям соответствующих исходных данных, в том числе аналитическим методом. Моделирование этапа выдачи ракет на пусковые установки с учетом их предварительной перегрузки на транспорт соединения предполагает операционный уровень детализации и соответственно разработку имитационной модели. Очевидно, что данный вариант декомпозиции рассматриваемого процесса соответствует приоритетной задаче исследования временных характеристик функционирования сил и средств ракетного соединения. Второй вариант декомпозиции, наоборот, направлен на исследование временных характеристик функционирования сил и средств ТРБ.

Таким образом, учитывая относительно детерминированный характер логистических процессов РТО, для их исследования целесообразно применение комбинированного метода, т.е. имитационно-аналитического моделирования. При этом состав комбинации методов в рамках моделируемого процесса определяется на основе анализа исходных данных и условий постановки задачи, доступного уровня детализации и возможных вариантов декомпозиции процесса. Разработка имитационно-аналитических моделей логистических процессов РТО позволит исследовать требуемые характеристики с необходимой точностью и при этом сократить трудозатраты, соответствующие полному имитационному моделированию процесса.

#### Список использованных источников:

1. Курбанов А., Мостовой А., Мартынов М. Концепция военной логистики в современных социально-экономических условиях / Логистика. 2012. № 10 (71). – С. 55-59.
2. Галаутдинов Р.Р. Виды логистики и их характеристика // Сайт преподавателя экономики. [2016]. URL: <http://galyautdinov.ru/post/vidy-logistiki> (дата обращения: 25.10.2018).
3. Руководство по эксплуатации ракетно-артиллерийского вооружения / под ред. Свертилова Н.И. – М: ГРАУ, 2006. – 611 с.
4. Лычкина Н.Н. Имитационное моделирование экономических процессов: учеб. пособие. – М.: Вузовский учеб.: Изд-во ИНФРА-М, 2014. – 254 с.
5. Стерлигов А.К. Использование метода имитационного моделирования в прикладных логистических задачах/ Логистика сегодня. 2006. № 1. с. 40-48.
6. Омельченко И.Н., Ножнов В.И. Использование методов аналитического и имитационного моделирования при проектировании складских комплексов/ Машиностроитель. 2006. № 6. с. 47-50.
7. Шукаев Д.Н., Абдулина В.З., Ламашева Ж.Б. Имитационно-аналитическое моделирование производственно-сбытовой системы/ Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 3. - С. 82-87.
8. Кузнецов В.Л., Горчаков А.И. Комбинированная имитационно-аналитическая модель пропускной способности аэродромной воздушной зоны / Научный вестник МГТУ ГА. 2016. № 224. – С. 33-42.
9. Боев В.Д. Об адекватности систем имитационного моделирования GPSS World и Anylogic/ Прикладная информатика. 2011. № 4 (34). - С. 30-40.
10. Горячева, И. А. Системный анализ факторов среды при функционировании логистической системы / И. А. Горячева, М. С. Шиловская // Известия СГУ им. Н. Г. Чернышевского, Серия Экономика. Управление. Право. - 2015. - Том 15. - выпуск 1. - С. 49-56.
11. Плашенков В.В. Системные исследования: основы, методы, проблемы и пути их решения: Монография. Ч. 1: Теоретические и методические основы технико-экономических исследований. - Череповец: ГОУ ВПО ЧГУ, 2006.
12. Имитационное моделирование в комплекте с оптимизацией: <http://anylogistix.ru> (дата обращения: 25.10.2018).