

© 2018 В. С. Тимченко

О ПРИНЦИПАХ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ, СОСТОЯЩЕГО ИЗ НЕЗАВИСИМЫХ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Тенденция к усложнению разрабатываемых имитационных моделей вызвала необходимость поиска путей снижения времени на разработку и реализацию имитационных моделей сложных систем. В статье проанализированы принципы разработки программного комплекса имитационного моделирования, состоящего из независимых имитационных моделей. Дается анализ особенностей статического и динамического вариантов взаимодействия имитационных моделей.

Ключевые слова: программный комплекс имитационного моделирования, независимые имитационные модели, технология повторного использования имитационных моделей, межплатформенный обмен результатами расчетов, архитектура распределенных систем имитационного моделирования.

Введение. Моделирование является методом исследования сложных систем [1] и происходящих в них процессов. В основе метода лежит замена исследуемого объекта и процессов моделью [2]. На сегодняшний момент метод имитационного моделирования получил должное развитие в отечественной науке и практике применительно ко всем сферам человеческой деятельности [3–4].

Однако, чем сложнее моделируемая система, тем сложнее ее модель, что вызвало необходимость поиска путей снижения времени на разработку и реализацию имитационных моделей сложных систем.

Постановка задачи. Решение данной задачи в мировой практике разработок имитационных моделей связано с технологиями повторного использования имитационных моделей (*Simulation-oriented model reuse, SOMR*) [5], которые обеспечивают совместное использование и интеграцию существующих моделей различных разработчиков для повторного использования в процессе их взаимодействия в комплексных проектах работы сложных систем, состоящих из большого числа разнородных имитационных моделей.

Следует отметить, что использование уже реализованных имитационных моделей в процессе разработки программного комплекса имитационного моделирования частично решает проблему их верификации, поскольку отладка программного комплекса имитационного моделирования сложной системы порой занимает больше времени, чем ее разработка. В данном случае можно считать, что программный комплекс имитационного моделирования работает адекватно, если доказана адекватность работы отдельных имитационных моделей и можно пренебречь искажением данных в процессе обмена между имитационными моделями при условии соблюдения внутренней логики сложной системы в структуре программного комплекса имитационного моделирования.

Основная часть. Рассмотрим два принципиальных варианта взаимодействия имитационных моделей:

Статический – на уровне данных, получаемых в результате прогона одной имитационной модели и используемых в качестве исходных данных для другой.

Динамический – параллельное моделирование в online-режиме, на уровне взаимодействия программных интерфейсов [6], где учет событий и смена состояний объектов в обеих имитационных моделях происходит относительно единой оси модельного времени.

API (application programming interface) – набор готовых классов, процедур, функций, структур и констант, предоставляемых приложением или операционной системой для использования во внешних программных продуктах. Используется программистами при написании внешних приложений.

Рассмотрим более подробно динамический вариант взаимодействия имитационных моделей, способом реализации сквозного моделирования в которых является стандартный дискретно-событийный подход с последовательной обработкой каждого очередного поступающего события.

В этом случае стоит более подробно остановиться на имитационных моделях, состоящих из нескольких уровней абстракции с иерархической логикой моделирования.

В частности, в имитационных моделях с двухуровневой логикой имитационного моделирования и откатом модельного времени к моменту нормального функционирования системы с момента технологического сбоя в системе. На верхнем уровне оперирование ведётся только с двумя базовыми событиями имитационной модели: поступление заявок в модель и удаление заявок из модели. Нижний уровень обеспечивает моделирование технологического процесса работы системы в соответствии с заданным уровнем абстракции, обусловленной структурой системы, с учетом сложившегося состояния системы на момент поступления заявки на вход имитационной модели.

Если попытка пропуска не удалась вследствие технологической ситуации в текущий момент модельного времени, т. е. не сгенерировано событие удаления заявки из имитационной модели, то восстанавливается состояние модели, предшествующее началу прогона, выполняется задержка заявки на последнем объекте, обеспечивающем возможность ожидания физического аналога заявки, и обработка заявок продолжается через заданный интервал времени до момента достижения конца заданного модельного интервала времени или же невозможности системы возобновить нормальную технологию работы после задержки заявки на объекте более максимально допустимого значения.

Особенность работы двухуровневых имитационных моделей приводит к невозможности совместного использования с имитационными моделями, не способными динамически прерывать процесс моделирования с откатом к некоторому заданному состоянию, привязанному к оси модельного времени и возобновлять моделирование с новыми входными параметрами на нижнем уровне моделирования.

К примерам таких моделей относится программный комплекс имитационного моделирования процессов перевозок (ИМПП), разработанный и развиваемый коллективом ИПТ РАН [7], которая обеспечивает расчет пропускной способности реконструируемой железнодорожной линии.

На данный момент алгоритм работы диспетчера модели ИМПП [8] обеспечивает два режима расчета пропускной способности, в зависимости от дисциплины обслуживания входящего поездопотока.

Первый режим – оценка максимальной пропускной способности при задании структуры поездопотока через соотношение различных категорий грузовых поездов [9] с различными перегонными временами хода, следующими в адрес различных станций назначения. Конкретные времена появления поездов в модели в данном случае не заданы. Порядок выбора поезда для пропуска определяется его текущим приоритетом, а время появления в системе – ближайшим подходящим моментом времени с начала моделирования, обеспечивающим возможность пропуска поезда по всему маршруту. Наличие информации о состоянии системы в любой момент модельного времени обеспечивает управление пропуском поездов с учетом полного объема оперативной информации обо всех обработанных ранее заявках с момента их поступления на вход имитационной модели до момента окончания моделирования;

Второй режим – оценка пропускной способности с учетом неравномерности поступления поездов на входе системы, обусловленное суточной неравномерностью движения поездов и местными условиями обработки поездопотока на технических станциях, когда перед началом цикла моделирования при равных приоритетах поездов входящего поездопотока фиксируется расписание их появления в системе, а порядок пропуска определяется расписанием. При этом осуществляется оперирование только оперативной информацией о состоянии системы, что обеспечивает выбор наилучшего поезда только из множества поездов, ожидающих отправления в пределах одного и того же периода модельного времени.

В любом из описанных режимов окончательная статистика пропуска поездов аккумулируется в архиве *Microsoft SQL Server* в момент окончания модельного времени или на момент полного использования пропускной способности исследуемой железнодорожной линии.

В терминах ИМПП пропуск поезда по железнодорожной линии предусматривает следующие базовые операции:

- прием поезда на станцию предусматривает проверку наличия свободности входной горловины и свободного приемо-отправочного пути достаточной полезной длины;

– отправление на свободный перегон в ближайший момент времени обеспечивается проверкой наличия свободности выходной горловины и возможности проследования по перегону до следующей станции;

– задержка поезда на технической станции для проведения технологических операций, длительность которых может генерироваться несколькими способами.

Случайным образом в соответствии с заданными законами распределения их длительностей, полученных на основе обработки статистических данных работы реальной железнодорожной станции, аналога моделируемой, либо статистических данных работы моделируемой станции, полученных в другой имитационной модели.

Путем параллельного имитационного моделирования работы технической станции во внешней имитационной модели с обменом информации путем взаимодействия программных интерфейсов независимых имитационных моделей с привязкой к единой оси модельного времени и возможностью синхронизированного отката с последующей оперативной корректировкой протекания единого технологического процесса, обеспечивающего исключение технологических сбоев.

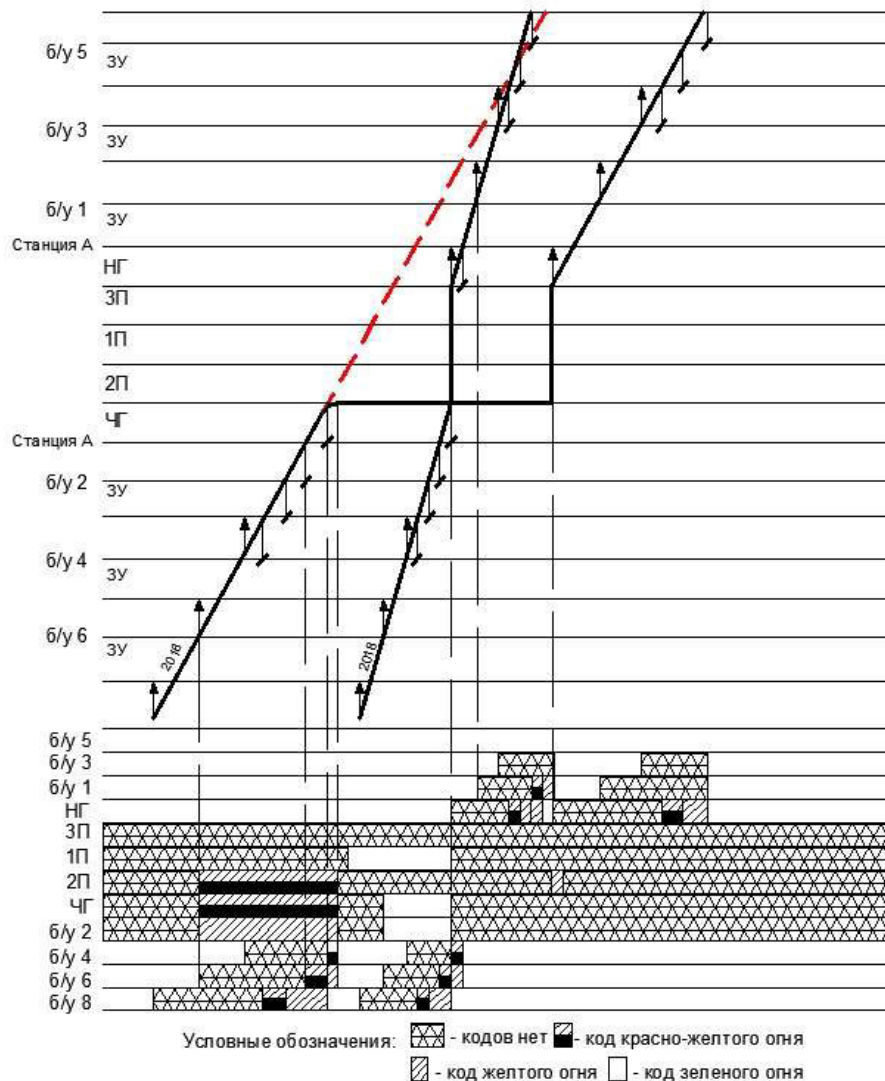


Рис. 1. Взаимодействие имитационной модели железнодорожного участка с имитационной моделью станции по корректировке движения поезда, исключающего столкновение поездов на перегоне

Сложность совместной работы независимой имитационной модели в online режиме и имитационной модели с двухуровневой логикой обусловлена необходимостью обеспечения синхронизированного отката модельного времени с момента технологического сбоя в моделировании (рис. 1) к моменту нормального функционирования обеих систем. Т. е. необходима привязка к единой оси модельного времени и возможность синхронизированного отката с

последующей оперативной корректировкой протекания единого технологического процесса, обеспечивающего исключение технологических сбоев.

На сегодняшний момент в ИМПП реализован первый вариант использования результатов работы внешних имитационных моделей.

Детальное же моделирование технологической работы технических и сортировочных станций – сортировочной работы, формирования и расформирования составов поездов, технического и коммерческого осмотров транзитных и местных поездопотоков, а также отцепки вагонов в ТОР и прицепка вагонов в пути следования до полновесного и полносоставного поезда и т. д. в ИМПП на данный момент детально не моделируется, а учитывается только укрупненно через длительность занятия приемо-отправочных путей, что и вызывает необходимость совместной работы независимых имитационных моделей, так как двухуровневая логика имитационного моделирования не позволяет модернизировать ИМПП в данном направлении, в связи с оперированием в качестве заявок поездами, а не вагонами и локомотивами. Учет оборота локомотивных бригад и количества бригад ПТО и ПКО также не предусмотрен.

Таким образом, подробное моделирование работы станции непосредственно в ИМПП, как и её взаимодействие со сторонними моделями в динамическом режиме на данном этапе не представляется возможным.

ИМПП последовательно осуществляет попытки пропуска поезда по всей железнодорожной линии. Карта состояний ИМПП [10], состояние системы (поездная ситуация) в каждый момент вдоль оси модельного времени всех объектов системы формируется на основе информации об уже пропущенных поездах.

Необходимость фиксации карты состояний в оперативной памяти имитационной модели вызвано тем, что заранее неизвестно, какая из попыток пропуска этого поезда будет успешной, и при неудачной попытке требуется восстановление карты состояний в требуемый момент модельного времени.

При создании внешних имитационных моделей железнодорожных станций, имеющих возможность использовать данные о технологии работы реальных станций, в соответствии с технико-распорядительным актом, обеспечивается учет влияния технологии их работы на пропускную способность железнодорожной линии. Передача результатов работы имитационной модели железнодорожной станции в виде моментов времени отправления поездов со станции, исходя из технологии и местных условий обработки транзитного поездопотока с переработкой и без переработки, а также местного потока поездов, генерируемого станцией обратно в ИМПП, обеспечивает уточняющий расчет пропускной способности полигона с учетом перерабатывающей способности и технологии работы железнодорожной станции.

Более простым вариантом взаимодействия имитационных моделей с точки зрения программирования является статический вариант взаимодействия моделей на уровне данных:

- имитационная модель (ИМ1) проводит моделирование и передает результаты на вход ИМ2, рассчитанный с учетом информации, импортированной ранее из ИМ2;
- ИМ2 выполняет цикл моделирования, достаточный для определения статистической информации для работы ИМ1, и экспортируется в качестве исходных данных имитационного моделирования в online-режиме.

Следует отметить, что автономная работа имитационных моделей создает проблемы привязки на оси времени событий в ИМ1 и ИМ2

В частности, на данный момент времени рассчитанные в ИМПП нитки графиков движения поездов будут не совпадать с историей обслуживания поездов в имитационной модели железнодорожной станции, так как данные по временам обслуживания поездов на станции в ИМПП генерируются случайным образом – по заданным законам распределения и практически гарантированно будут отличаться от «точно» рассчитанных времен обслуживания этого поездопотока в имитационной модели станции, пусть даже и подчиняющимся аналогичным законам распределения.

Таким образом, динамический вариант взаимодействия имитационных моделей обеспечивает более корректный расчет, так как «пиковые» загрузки станции, как правило, совпадают с «пиковыми» нагрузками железнодорожных участков вследствие их взаимного влияния, в частности, в условиях предоставления «окон» для проведения ремонтных работ [11]. При этом обеспечить «принудительную» генерацию более длительных промежутков времени за-

нятия приемо-отправочных путей, вызванных загрузкой технических станций, а не свободностью железнодорожных участков при задании длительности занятия приемо-отправочных путей законами распределения в условиях статического взаимодействия имитационных моделей, не представляется возможным. Кроме того, технические станции в большинстве случаев ограничивают пропускную способность железнодорожных линий, что приводит в условиях «пиковых» нагрузок к сложности учета влияния непроизводительных простоев поездов на предыдущих станциях и парках отправления технических станций вследствие занятости парка приема технической станции или предоставления «окна» на железнодорожном перегоне на пропускную способность железнодорожной линии в условиях статического взаимодействия имитационных моделей.

Сложность динамического взаимодействия имитационных моделей также вызвана необходимостью обеспечения однозначной идентификации объектов путевого развития железнодорожной станции в обеих имитационных моделях в online-режиме с возможностью привязки к единой оси модельного времени. То есть, по сути, речь идет о возможности интеграции независимой имитационной модели, оперирующей такими объектами, как железнодорожные вагоны, локомотивы, локомотивные бригады, бригады коммерческого и технического осмотра и т. д. в виде третьего уровня имитационного моделирования (рис. 2).

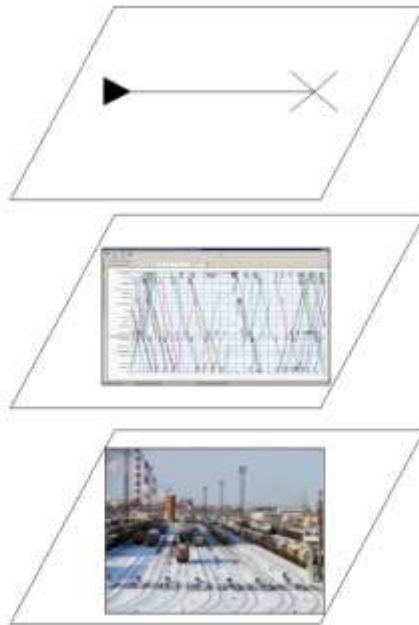


Рис. 2. Трехуровневое имитационное моделирование

Стоит отметить, что детальное моделирование работы по расформированию и формированию составов поездов, а также моделирование сортировочной работы по обработке местного вагонопотока и транзитного с переработкой значительно усложнит структуру имитационной модели, поэтому при ее разработке необходимо выдержать баланс между сложностью имитационной модели, требуемой точностью результатов имитационного моделирования, исходя из целей, решаемых с помощью имитационной модели. Так, для решения задач стратегического уровня на перспективу 15 и более лет требования к точности расчета будут ниже, чем при решении оперативных задач.

Если же ни одна из имитационных моделей ни является многоуровневой, то динамическое взаимодействие имитационных моделей является хоть и более трудозатратным в плане реализации, но обеспечит большую точность результатов имитационного моделирования.

Так, технологии повторного использования имитационных моделей поддерживаются специальными стандартами [12] или сводами правил, которые определяют универсальные подходы к организации программных имитаторов, обеспечивают использование имитационных моделей и их переносимость между средами имитационного моделирования.

Например, *XML* [13] обеспечивает разработку программного комплекса межплатформенного обмена результатами расчетов независимых имитационных моделей.

Стандарты *High Level Architecture (HLA)* [14] и *Distributed Interactive Simulation (DIS)* определяют архитектуру распределенных систем имитационного моделирования, позволяющий разработать программный комплекс имитационного моделирования, реализовав технологию повторного использования имитационных моделей.

Полученный в результате интеграции программный комплекс имитационного моделирования должен обеспечивать исследование поведения сложной системы в целом и влияния составных частей друг на друга, при этом легко модифицироваться и расширяться за счет модульной архитектуры.

При выполнении имитационного моделирования каждая модель выполняет заложенные в нее алгоритмы и взаимодействует с другими программами посредством подписок на выходные данные других моделей. Подписки реализуются на основании построенного информационно-графического описания.

Выводы. В работе проанализированы принципы разработки программного комплекса имитационного моделирования, состоящего из независимых имитационных моделей. Дается анализ особенностей статического и динамического вариантов взаимодействия имитационных моделей в условиях особенностей двухуровневой логики имитационного моделирования одной из независимых имитационных моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Павлов А.И., Столбов А.Б. Архитектура системы поддержки проектирования агентов для имитационных моделей сложных систем // Программные продукты и системы. 2015. № 1. С. 12–16.
- 2 Петухов О.А. Моделирование: системное, имитационное, аналитическое: учеб. Пособие. СПб. : Изд-во СЗТУ, 2008. 288 с.
- 3 Жихарев А.Г., Корчагина К.В. О системно-объектном имитационном моделировании // Национальная ассоциация ученых (НАУ). Физико-математические науки. 2015. № IX (14). С. 100–102.
- 4 Перфильев П.Н. Применение имитационного моделирования в наукоемких технологиях лесопромышленных процессов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. № 2. С. 278–282.
- 5 Liu Y., Zhang L., Zhang W., Hu X. An overview of simulation-oriented model reuse. Theory, methodology, tools and applications for modeling and simulation of complex systems // Springer. 2016. vol. 646. P. 48–56.
- 6 Meloni S., Rosati M., Federico A., Ferraro L., Mattoni A., Colombo L. Computational materials science application programming interface (cmsapi): a tool for developing applications for atomistic simulations // Computer Physics Communications. 2005. Т. 169. № 1–3. С. 462–466.
- 7 Тимченко В.С. Оценка пропускной способности реконструируемой железнодорожной линии на основе имитационного моделирования: дис... канд. техн. наук. СПб., 2017. 223 с.
- 8 Тимченко В.С., Ковалев К.Е., Хомич Д.И. Имитационное моделирование на железнодорожном транспорте : монография. Саарбрюккен, Германия: LAP. LAMBERT Academic Publishing, 2017. 172 с.
- 9 Тимченко В.С. Расчет пропускной способности двухпутного железнодорожного участка с учетом категорий грузовых поездов методом имитационного моделирования процессов перевозок // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». Том 7. № 5 (2015). <http://naukovedenie.ru/PDF/12TVN515.pdf> (доступ свободный). DOI: 10.15862/12TVN515.
- 10 Кокурин И.М., Тимченко В.С. Оценка методом имитационного моделирования возможности освоения прогнозируемых объемов перевозок грузов по железнодорожной линии, обслуживающей морской порт // Вестник транспорта Поволжья. 2014. № 6. С. 39–44.
- 11 Романова П.Б., Король А.А. Определение законов распределения поступления поездов на сортировочную станцию в штатном режиме работы станции и в период ремонта объектов транспортной инфраструктуры на прилегающих к станции участках // Вестник транспорта Поволжья. 2016. № 5. С. 63–68.
- 12 Ноженкова Л.Ф., Исаева О.С., Марков А.А. Реализация технологии повторного использования имитационных моделей в инфраструктуре моделирования // Фундаментальные исследования. 2017. № 11. С. 103–107.
- 13 Муравьева-Витковская Л.А. Моделирование интеллектуальных систем. СПб. : НИУ ИТМО, 2012. 145 с.
- 14 Лопаткин Р.Ю., Петров С.А., Игнатенко С.Н., Иващенко В.А. Перспективы применения имитационного моделирования в задачах автоматизации и управления технологическими системами // Вестник НТУ «ХПИ». 2015. № 17 (1189). С. 61–71.