

УДК 681.3

Технология проектного моделирования транспортных систем региона, функционирующих в условиях случайных воздействий

Е. И. СУКАЧ

Введение. Проблеме проектного моделирования транспортных систем (ТС) уделяется всё больше внимания исследователей. Для решения наиболее важных задач анализа ТС разработан ряд аналитических методов [1], которые позволяют найти приближённое решение для ряда частных случаев, но ограничивают исследователя в составе и количестве задаваемых параметров. Как правило, они применимы в том случае, когда значения параметров компонентов системы являются детерминированными величинами и позволяют найти решение частных задач оптимизации транспортных потоков.

Однако реальные ТС функционируют в условиях случайных воздействий, которые обусловлены неравномерностью дорожного трафика, случайными временами перемещения транспортных единиц, качественной неоднородностью отдельных участков сети и другими факторами. Кроме этого, как показывает практика, оптимальность маршрутов, определяющая качество перевозочного процесса, может обеспечиваться не только сокращением сроков перевозок или транспортных затрат, но и безопасностью маршрутов. Поэтому выбор оптимального варианта организации функционирования ТС предполагает комплексное рассмотрение и учёт всех аспектов функционирования ТС.

Имитационное моделирование позволяет учесть всё многообразие транспортных ситуаций и их стохастическое проявление, что делает этот способ исследования более предпочтительным. А поскольку выбор того или иного метода обусловлен типом задачи и степенью детализации, то создание комплекса исследования ТС, сочетающего результаты аналитических методов с возможностями имитационного моделирования позволит расширить множество решаемых задач и более точно описать реальные ТС.

Вероятностный характер функционирования ТС обуславливает необходимость проведения серии имитационных экспериментов (ИЭ) с использованием метода Монте-Карло [2]. Как следствие, полученные результаты имитации также являются вероятностными, что определяет проблему верификации имитационных моделей (ИМ) ТС. Поскольку имитация представляет собой ресурсоёмкую процедуру, то возникает необходимость разработки средств автоматизации этапов проектного моделирования ТС. Наконец, постановка ИЭ с моделями ТС, требует настройки формального описания ТС для различных направлений анализа и различных типов транспортных сред (железнодорожная сеть, сеть автомобильного транспорта, сеть городского транспорта). Создание средств автоматизации, реализующих методики формализации ТС, требует разработки технологий их использования специалистами в области управления транспортными потоками, обычно не владеющими методиками компьютерного моделирования на необходимом уровне. Поэтому и средства имитации различных ТС и технология их применения должны быть предметно-ориентированными, позволяющими пользователям проводить ИЭ на уровне их профессиональной подготовки.

Перечисленные проблемы исследования ТС определяют актуальность разработки специализированного комплекса имитации ТС, сочетающего преимущества аналитических и имитационных методов, и технологий его использования при решении задач проектного моделирования ТС, функционирующих в условиях случайных воздействий. В статье излагаются основы формализации ТС, состав комплекса имитации ТС и технология его использования при решении задач исследования поведения различных транспортных сред.

Особенности формализации транспортных систем. В качестве аппарата формализации ТС используется её представление в виде графа $G=\{N,U\}$, состоящего из множества вершин N и множества рёбер U , соединяющих эти вершины. Вершины и рёбра образуют множество статических элементов сети (STEL). Вершины графа представляют отдельные узлы транспортной сети, которые могут быть пунктами отправления, назначения или промежуточными пунктами, и относятся к множеству $STEL_1$. Рёбра графа – это участки дорог между двумя пунктами сети. Они образуют множество статических элементов $STEL_2$.

Для ТС характерны связи между элементами сети, реализованные в виде обмена транспортными потоками. Транспортные потоки образуют единицы транспорта, которые составляют множество динамических элементов ТС (DEL) и могут быть двух типов. Для описания простых транспортных единиц используются динамические элементы первого типа DEL_1 , которые в модели представляются информационными транзактами, имитирующими вагоны для железнодорожной сети или автомобили для автомобильной сети. Составные транспортные единицы описываются динамическими элементами второго типа DEL_2 , которые в ИМ представлены в виде сложных составных транзактов, включающих множество информационных транзактов и имеющих свои параметры. В железнодорожной ТС составы, формируемые из вагонов, являются динамическими элементами второго типа DEL_2 .

При описании статических элементов следует учитывать семантику ТС, которая выражается набором атрибутов, приписываемых дугам и вершинам. В качестве весовых характеристик рёбер ($STEL_2$) используются различные характеристики, такие как: пропускная способность участка сети (c_{ij}); провозная способность участка сети (g_{ij}); длина участка сети (l_{ij}); стоимость перемещения одной транспортной единицы по участку сети (q_{ij}); величина потока на участке сети (x_{ij}); величина внутреннего потока на участке сети (xv_{ij}).

Расширение аналитического аппарата формализации ТС состоит в добавлении к описанию узлов сети ($STEL_1$) характеристик ресурсов, необходимых для реализации обслуживания транспортных единиц в узлах, а именно: объема индивидуально используемого ресурса j -го типа в i -м узле ($VIST_{ij}$); объема коллективно используемого ресурса j -го типа в i -м узле ($VKST_{ij}$); времени обслуживания динамического элемента в i -м узле (t_{idel}); стоимости обслуживания динамического элемента в i -м узле (q_{idel}).

При перемещении транспортных единиц по сети реализуется обслуживание динамических элементов DEL статическими элементами ТС STEL. Алгоритм обработки j -го динамического элемента (DEL_j) статическими элементами сети задаётся маршрутом ($MDEL_j$), который формируется в соответствии с матрицей назначений и записан в «теле» транзакта, имитирующего перемещение DEL_j . Матрица назначений представляет собой вариант распределения потока в ТС, полученный в результате нахождения максимального потока для ТС [3]. При обслуживании DEL статическими элементами $STEL_1$ реализуется захват ресурсов используемых коллективно и индивидуально. При обслуживании DEL статическими элементами $STEL_2$ необходимо учитывать, что оно реализуется с использованием коллективно используемого ресурса, объём которого задаётся величиной пропускной способности участка. Это условие влечёт появление конкуренции DEL за ресурсы $STEL_2$.

Решающим условием успешной работы ТС является наличие резервов ресурсов статических элементов, которые должны выражаться в некоторой избыточности – дополнительных средствах (для $STEL_1$ в железнодорожной сети необходимы резервы разгрузочно-погрузочных средств, подвижного состава, путей формирования составов, маневровых локомотивов) или дополнительных возможностях (для $STEL_2$ в любой транспортной среде необходимы резервы пропускной способности). Большое значение для устойчивого функционирования железнодорожных ТС является временное резервирование, то есть время, не занятое пропуском поездов. Определение необходимых резервов ресурсов позволит повысить эффективность функционирования ТС, а выявление и использование избыточного времени будет способствовать повышению их надёжности.

Для каждого статического элемента первого типа ($STEL_1$) определяются группы параметров, переменных и откликов модели:

– множество задаваемых характеристик рабочей нагрузки (РН) на узел сети, которое составляют функция распределения структуры транспортного потока и функция распределения интенсивности поступления в узел сети транспортных единиц (DEL_j);

– множество задаваемых характеристик состава и структуры технологических операций узла сети, на основании которых формируются матрица затрат на организацию обслуживания динамических элементов и матрица длительностей обслуживания динамических элементов (DEL_j);

– управляемый параметр выбора стратегии (участковая или сквозная) обслуживания DEL_2 ;

– управляемый параметр выбора режима организации функционирования статических элементов ($STEL_1$) с помощью графа структуры технологических операций узла сети, который определяется в соответствии с сетевым графиком выполнения работ по формированию-расформированию и техническому обслуживанию динамических элементов, суммарным объемом ресурсов коллективного и индивидуального пользования, имеющимся в распоряжении $STEL_1$;

– интегральные отклики имитации, включающие средние значения коэффициентов загрузки статических элементов ($STEL_1$), времени обслуживания динамических элементов (DEL_j), затрат на реализацию обслуживания динамических элементов (DEL_j), эффективности работы статических элементов ($STEL_1$).

Статические элементы второго типа ($STEL_2$) имеют следующий состав параметров, переменных и откликов модели:

– множество задаваемых характеристик РН на участок сети, представленных функцией распределения структуры транспортного потока, функцией распределения величины транзитного потока, функцией распределения величины внутреннего потока;

– множество характеристик по обслуживанию транспортных единиц (DEL_j), которые определяются длиной участка сети, функцией распределения пропускной способности участка, функцией распределения провозной способности участка, матрицей стоимостей на перемещение транспортных единиц, составляющих поток на участке ($STEL_2$);

– управляемый параметр режима функционирования участка сети ($STEL_2$), который определяется сочетанием случайных факторов внешней среды;

– отклики имитации, отражающие средние значения коэффициентов загрузки статических элементов ($STEL_2$), времени обслуживания динамических элементов (DEL_j), затрат на реализацию обслуживания динамических элементов (DEL_j), эффективности работы статических элементов ($STEL_2$).

Для динамических элементов (DEL_j) предполагается определение следующих параметров, переменных и статистик моделирования:

– множество характеристик динамического элемента, отражающие его свойства, а именно: номер пункта отправления, функция распределения пунктов назначения, функция распределения количества простых транспортных единиц, составляющих составную транспортную единицу (DEL_2), функция распределения массы транспортной единицы вместе с грузом, функция распределения скорости перемещения транспортной единицы;

– множество характеристик обслуживания в узлах сети ($STEL_1$) включает функции распределения объемов индивидуально и коллективно используемых ресурсов;

– управляемый параметр, определяющий маршрут перемещения динамического элемента по сети ($MDEL_j$);

– множество статистик имитации, включающее средние значения времени и затрат обслуживания динамических элементов статическими элементами $STEL_1$ и $STEL_2$, времени и стоимости перемещения совокупности DEL , образующих интегральный транспортный поток из пунктов отправления в пункты назначения.

Состав комплекса имитации транспортных систем. Для реализации ИМ ТС согласно изложенным особенностям формализации разработан комплекс моделирования, который позволяет автоматизировать большую часть этапов общей методики постановки ИЭ

[2], адаптированных для случая исследования различных транспортных сред региона. Структурно комплекс имитации ТС включает следующие подсистемы:

- технологическую оболочку комплекса, организующую диалоговое взаимодействие пользователя с подсистемами комплекса (INTF);
- подсистему имитации функционирования ТС по методу Монте-Карло (IM_MK);
- подсистему моделирования транспортных потоков в сети на основе сочетания алгоритма Форда-Фалкерсона и метода Монте-Карло (IM_AM);
- подсистему исследования вероятностных характеристик сети с использованием логико-вероятностного моделирования (IM_LM);
- подсистему оптимизации и принятия решений (OPTIM);
- подсистему динамического отображения результатов моделирования (VIZ).

Подсистема имитации IM_MK структурно состоит из следующих частей: базовой системы моделирования; подсистемы испытания и исследования свойств ИМ ТС; библиотеки описаний элементов различных транспортных сред; библиотеки параметризованных «заготовок» ИМ различных транспортных сред; информационной базы данных. Возможности MICIS4 [4] определили выбор её в качестве базовой при разработке подсистемы.

Подсистема моделирования транспортных потоков IM_AM предназначена для определения максимального потока и его распределения по сети, функционирующей в условиях случайных воздействий [3]. В её состав входит набор процедур, реализующих: имитацию по методу Монте-Карло, определение максимального потока с использованием алгоритма Форда-Фалкерсона, нахождение интегрального максимального потока для различных направлений потоков, управление моделированием.

Подсистема моделирования IM_LM предполагает исследование вероятностных характеристик сети на различных уровнях детализации [6] и включает следующие основные части: подсистему вероятностного моделирования участков сети (STEL₂); подсистему логического моделирования всей транспортной сети; блок управления процессом моделирования; базу знаний, содержащую сведения о моделируемой транспортной среде.

Результаты моделирования подсистем IM_AM и IM_LM могут использоваться как для принятия решений по управлению и модификации ТС, так и служить входными данными для организации ИЭ с моделями ТС по методу Монте-Карло.

Технология использования комплекса имитации транспортных систем региона при решении задач проектного моделирования. Комплекс имитации ТС предполагает два режима проведения исследований: режим ежесуточного моделирования функционирования ТС и проектного моделирования вариантов организации ТС. Первый режим позволяет оценить сложившуюся ситуацию в ТС и определить необходимые корректирующие меры для ликвидации нежелательных последствий. Второй режим обеспечивает разработку планов по реконструкции дорог и модификации функционирования всей ТС.

Особенности согласованного взаимодействия аналитических и имитационных методов для исследования ТС, которые лежат в основе разработки подсистем IM_AM и IM_LM, излагались в работах [3] и [6] соответственно. При проектном моделировании ТС с использованием подсистемы IM_MK необходимо соблюдать следующую последовательность технологических этапов.

Этап 1. Составление содержательного описания ТС региона на основе технической документации и формулировка требований к исследованию. Этап практически не автоматизируется, и применение подсистемы имитации IM_MK не требуется.

Этап 2. Формирование концептуальной модели ТС. Определяется состав параметров, переменных и откликов моделирования.

Этап 3. Формализация ТС на основе информации, полученной на этапе 1 и 2. Прежде всего, формируется графовая структура исследуемой сети. С целью уменьшения размерности графа используется процедура линейного сжатия, которое происходит за счет объединения нескольких последовательных ребер в одно. Затем выделяются статические (STEL) и динамические элементы ТС (DEL), для которых определяются значения переменных, параметров

и откликов моделирования. Функции распределения параметров элементов ТС могут быть получены с использованием подсистем комплекса ИМ_АМ и ИМ_ЛМ.

Этап 4. Разработка компонентов, составляющих ИМ ТС с помощью базовой системы моделирования MICIC4 с последующей их каталогизацией в библиотеке элементов.

Этап 5. Разработка параметризованных «заготовок» ИМ ТС. Этап реализуется путём объединения компонентов ИМ ТС, добавления в текст ИМ операторов синхронизации, сбора статистики, добавления программ начала и завершения моделирования. В итоге формируется универсальная «заготовка» ИМ ТС, специализированная для исследования определённой транспортной среды региона. Завершается этап каталогизацией «заготовок» ИМ рассматриваемой ТС в библиотеке заготовок подсистемы ИМ_МК комплекса имитации.

Этап 6. Компиляция h-ого варианта ИМ ТС региона из «заготовок» и описаний компонентов ИМ ТС. При этом реализуются универсальные процедуры информационной «стыковки» компонентов ИМ ТС, задания исходной информации скомпилированного варианта ИМ ТС, верификации алгоритмов функционирования ИМ ТС.

Этап 7. Испытание и исследование свойств ИМ ТС предполагает проведение следующих процедур: оценки точности имитации; отыскания длины переходного периода имитации; оценки устойчивости имитационных процедур; оценки чувствительности ИМ по параметрам и откликам с ранжированием их между собой по средним значениям интегральных откликов; отыскания рабочей области параметров ИМ. Результаты выполнения этапа позволяют убедиться в адекватности ИМ реальному объекту имитации.

Этап 8. Организация ИЭ по методу Монте-Карло для h-го варианта ИМ ТС с помощью процедур технологического обеспечения подсистемы ИМ_МК. По результатам ИЭ в информационной базе данных подсистемы формируются выборки статистик имитации. По этим выборкам определяются средние значения откликов и их выборочные дисперсии.

Этап 9. Анализ результатов многопрогонных ИЭ с использованием подсистемы оптимизации и принятия решений OPTIM, в которой реализована технология векторной оптимизации и принятия решений на основе классических критериев.

Каждый h-ый вариант организации функционирования ТС оценивается с помощью вектора $\|Y_h\|$, компонентами которого являются характеристики времени перемещения множества DEL_j ($\bar{Y}_{1h} = \bar{T}_{jh}$), стоимости перемещения множества DEL_j ($\bar{Y}_{2h} = \bar{Q}_{jh}$), коэффициентов загрузки участков дорог сети $STEL_{2j}$ ($\bar{Y}_{3h} = \bar{\eta}_{2jh}$) и коэффициентов загрузки узлов сети $STEL_{1j}$ ($\bar{Y}_{4h} = \bar{\eta}_{1jh}$). Поэтому для выбора наиболее эффективного варианта организации ТС предполагается применение методов векторной оптимизации.

Перечисленные выше составляющие вектора $\|Y_h\|$, будучи откликами ИМ, разнотипны по сути оптимизации (одни из них требуют максимизации, а значения других откликов необходимо минимизировать). Поэтому для сравнения вариантов организации функционирования ТС все отклики желательно приводить к одному типу оптимизации и проводить покомпонентную нормировку их значений, чтобы они изменялись в интервале $[0,1]$. Следует учитывать, что для реальных ТС число вариантов их организации ограничено относительно неизменной графовой структурой сети, утверждённым планом формирования транспортных потоков, устойчивым расписанием перемещения транспортных единиц, а сами значения параметров обслуживания динамических элементов (DEL) статическими элементами сети являются дискретными и вероятностными. Поэтому осуществляется не оптимальный в классическом понимании перебор всевозможных вариантов организации функционирования ТС, а выбор из ограниченного набора вариантов её рациональной организации. Операция приведения вектора откликов $\|Y_h\|$ к обобщённому скалярному отклику $\bar{W}_h$ осуществляется на основе известных методов [5].

Транспортная сеть подвергается воздействию внешней среды и со временем изменяет своё состояние, которое характеризуется сочетанием ряда параметров и определяет её из-

нос. Износ сети оценивается с использованием подсистемы ИМ_ЛМ комплекса имитации, в результате работы которой формируется вектор вероятностей $\|p_i(t)\|$, определяющий нахождение сети в каждом из состояний в рассматриваемый момент времени. Из-за вероятностного характера воздействия внешней среды на статические элементы сети необходимо исследовать организацию ТС для каждого её состояния, возможного с вероятностью p_i , $i=1, \dots, m$. В результате моделирования различных вариантов организации ТС в условиях неопределённости состояния самой сети формируются матрицы обобщённых откликов $\|\bar{Y}_{hl}\|$, в которой столбцами являются векторы обобщённых откликов ($\bar{Y}_{hl}$) при l -ых состояниях сети. Далее с помощью известных критериев принятия решений [5] выбирается номер рационального варианта организации ТС, который оптимален в смысле выбранного критерия при заданном распределении вероятностей состояний сети $\|p_i(t)\|$.

Следует отметить, что технология использования комплекса ИМ ТС не только многоэтапна, но и итеративна. При этом исследователю зачастую приходится возвращаться на более ранние этапы для ликвидации ошибок описания динамики взаимодействия элементов ТС. Вероятностный характер ТС существенно усложняет технологию проектного моделирования ТС, и поэтому комплекс ИМ ТС может существенно ускорить исследования за счёт автоматизации большинства этапов.

Заключение. Применение итеративной многоэтапной технологии исследования ТС, функционирующих в условиях случайных воздействий позволит исследователям найти наиболее эффективные варианты организации транспортных потоков в существующих сетях региона, экспериментировать с моделями предполагаемых ТС, а также исследовать поведение систем в новых ситуациях.

Abstract. Technology of design modeling of region transport systems functioning in the conditions of random actions is considered in the paper.

Литература

1. Зайченко, Ю. П. Исследование операций / Ю. П. Зайченко. – Киев: Издат.дом. «Слово», 2002. – 320 с.
2. Максимей, И. В. Имитационное моделирование на ЭВМ / И.В. Максимей. – М.: Радио и связь, 1983. – 230 с.
3. Максимей, И. В. Использование имитационного моделирования для нахождения интегрального максимального потока в транспортной сети региона / И. В. Максимей, Е. И. Сукач, П. В. Гируц // Реєстрація, зберігання і обробка даних (Data Recording, Storage&Processing). – Т.10.– №1.– 2008.– С.49-58.
4. Левчук, В.Д. Программно-технологические комплексы имитации сложных дискретных систем / В. Д. Левчук, И. В. Максимей. – Гомель, 2006. – 261 с.
5. Задачи и модели исследования операций. Ч. 3. Технология имитации на ЭВМ и принятие решений: Уч. пособие / И. В. Максимей, В. Д. Левчук, С. П. Жогаль, В. Н. Подобедов, под общ. ред. И.В. Максимей. – Гомель: БелГУТ, 1999. – 109 с.
6. Сукач, Е.И. Использование логико-вероятностного моделирования для исследования характеристик транспортной сети / Е. И. Сукач // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – №5 (44). – 2007.– С.77-81.