

ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

Abstract. For decision-making in control systems on transport it is offered to use the comprehensive approach grounded on simulation of transport streams of various level. For handling transit streams the task of definition of the most effective maximum stream of a network is desired. The ice of a variant of functioning network of public transport is realized by simulation of interaction of a volume of passenger traffic and a transport stream.

Key words: imitation models, transport networks, a maximum stream, stream of passengers.

Анотація. Для ухвалення рішень у системах управління на транспорті пропонується використовувати комплексний підхід, заснований на імітаційному моделюванні транспортних потоків різного рівня. Для управління транзитними потоками вирішується завдання визначення найбільш ефективного максимального потоку мережі. Вибір варіанта функціонування мережі суспільного транспорту реалізується шляхом моделювання взаємодії пасажиропотоку і потоку транспорту.

Ключові слова: імітаційні моделі, транспортна мережа, максимальний потік, потік пасажирів.

Аннотация. Для принятия решений в системах управления на транспорте предлагается использовать комплексный подход, основанный на имитационном моделировании транспортных потоков различного уровня. Для управления транзитными потоками решается задача определения наиболее эффективного максимального потока сети. Выбор варианта функционирования сети общественного транспорта реализуется путём моделирования взаимодействия пассажиропотока и потока транспорта.

Ключевые слова: имитационные модели, транспортная сеть, максимальный поток, поток пассажиров.

1. Введение

Транспортные сети (ТС) являются объектами графовой структуры и поэтому для их исследования применимы методы теории графов. Однако алгоритмы и модели, построенные на основе этих методов, не позволяют учесть динамически изменяющиеся характеристики и случайный фактор при функционировании транспортных систем. Поэтому применение имитационного моделирования, разработка специализированных структур и алгоритмов, позволяющих наилучшим образом решать поставленные задачи, значительно облегчат этот процесс и обеспечат переход на новый, качественно более высокий уровень проектирования и управления транспортными системами.

Для принятия решений, позволяющих учесть случайный характер функционирования ТС и многообразие составляющих её потоков, предлагается использовать комплекс автоматизации имитационного моделирования транспортных систем [1], обеспечивающий процесс исследования ТС путём использования одной из моделей, модифицированной с учётом имеющихся данных и критериев поиска вариантов организации транспортного процесса. Для управления транзитными транспортными потоками предлагается использовать модель автомобильных транзитных потоков (IM_ATR). С целью выбора варианта организации потоков общественного транспорта предлагается использовать имитационную модель обслуживания пассажиропотоков сетью общественного транспорта (IM_GTS).

В статье описывается состав комплекса автоматизации имитационного моделирования транспортных систем, излагаются возможности имитационной модели автомобильных транспортных потоков для организации управления потоками исследуемого региона, даётся описание имитационной модели обслуживания пассажиропотоков сетью общественного транспорта, позволяющей согласовать во времени и в пространстве перемещение пассажиров и транспортных средств, оценить стоимость проезда и объёмы перевозок.

2. Состав комплекса автоматизации имитационного моделирования транспортных систем

Комплекс автоматизации имитационного моделирования (ИМ) ТС, позволяющий автоматизировать большую часть этапов общей методики постановки имитационных экспериментов (ИЭ), адаптированных для случая исследования различных транспортных сред, структурно включает следующие компоненты:

- ИМ автомобильных транзитных потоков региона (IM_ATR);
- ИМ городской транспортной сети (IM_GTS);
- ИМ сортировочной станции железнодорожной сети (IM_JST);
- ИМ участка железнодорожной сети (IM_JD);
- ИМ железнодорожной сети (IM_JS);
- логико-вероятностную модель транспортной сети (IM_LM);
- технологическую оболочку комплекса, организующую диалоговое взаимодействие пользователя с имитационными моделями комплекса (INTF);
- подсистему испытания и исследования свойств ИМ комплекса (ISPT);
- подсистему оптимизации и принятия решений (OPTIM);
- подсистему отображения результатов моделирования (VIZ).

IM_ATR позволяет определить интегральный максимальный поток и наиболее эффективный вариант распределения этого потока в сети с учётом наличия множества входов и выходов исследуемой сети.

IM_GTS предназначена для исследования эксплуатационных характеристик городской ТС общественного транспорта, имеющей вероятностный характер функционирования.

IM_JST позволяет исследовать технологический процесс переработки транзитного вагонопотока на железнодорожной сортировочной станции. IM_JD служит для оптимизации процесса перемещения составов на участках железнодорожной сети. IM_JS предназначена для анализа эффективности вариантов организации перевозочного процесса на железнодорожной сети при условии выполнения установленного плана формирования составов (ПФС), реализуемого в условиях случайных воздействий.

IM_LM предполагает исследование вероятностных характеристик износа ТС на различных уровнях детализации.

Имитационные модели IM_JST, IM_JD, IM_JS, IM_GTS реализованы с использованием базовой системы моделирования MICIC4 [2], которая использует библиотеку программ и широко распространённый объектно-ориентированный язык программирования C++. Модели параметризованы и могут использоваться научно-исследовательскими подразделениями транспортных организаций. При модификации их алгоритмов от программиста не требуется изучения нового языка моделирования, приобретения опыта верификации и отладки программ ИМ. Он использует привычный полнофункциональный инструмент интегрированной среды разработки приложений на C++.

Взаимодействие имитационных моделей и подсистем комплекса, отвечающих за диалоговое взаимодействие (INTF), испытание и исследование свойств ИМ комплекса (ISPT), оптимизацию и принятие решений (OPTIM), отображение результатов моделирования (VIZ),

осуществляется через общую информационную базу данных комплекса, которая реализована универсальными программными средствами. В ней хранятся исходные данные, связывающие геометрическое представление объектов, имеющих пространственную природу, с таблицами параметров, характеризующих свойства этих объектов. В процессе моделирования в таблицах базы данных накапливаются статистические данные, позволяющие вычислить отклики имитации.

Технологические подсистемы комплекса позволяют быстро выполнить расчеты, наглядно отобразить полученные результаты и оперативно выбрать стратегию управления ТС. Стандартные форматы представления данных моделирования обеспечивают не только удобство при работе с данными, но и их переносимость, информационную совместимость с работами по смежной тематике, возможность обмена материалами.

3. Управление транзитными потоками транспортной сети

При управлении транзитными потоками исследуемой ТС следует учитывать, что все они одновременно движутся в различных направлениях, которые определяются множеством входов и множеством выходов. Требуется найти величину максимального интегрального потока в выбранном направлении и наиболее эффективный вариант распределения этого потока в сети с учётом наличия внутренних потоков на участках сети.

ТС представляется графом $G(U, N)$, где $\{U\}$ – множество рёбер, $\{N\}$ – множество узлов. Пересечения дорог соответствуют узлам графа. Участки дорог, определяющие ребра между узлами графа, описываются следующими характеристиками: пропускной способностью (c_{ij}), длиной (l_{ij}), стоимостью перемещения одной транспортной единицы (q_{ij}), величиной потока (x_{ij}). Пропускная способность участка ТС определяется максимальным количеством транспортных средств, которое он способен пропустить за единицу времени. Длина дороги задаётся в условных единицах. Величина потока определяет фактическое количество единиц транспорта, движущееся по участку сети. Предполагается, что величина потока на участке не может превышать пропускную способность этого участка.

В том случае, если в ТС рассматривается транзитный поток, имеющий один вход (исток) и один выход (сток), а пропускные способности участков являются постоянными (целыми) величинами, для нахождения максимального потока используется классический алгоритм Форда-Фалкерсона [3]. Это итеративный алгоритм, который, начиная с некоторого начального потока, наращивает его до тех пор, пока он не станет максимальным. На каждом шаге алгоритма Форда-Фалкерсона находится произвольный ненасыщенный путь, и поток по этому пути увеличивается таким образом, чтобы хотя бы на одном ребре величина потока стала равной пропускной способности. Выполнение алгоритма заканчивается, если не удастся найти ненасыщенный путь из истока в сток. Следует отметить, что алгоритм Форда-Фалкерсона не определяет способ выбора очередного ненасыщенного пути для последующего его насыщения.

Существуют различные варианты развития алгоритма Форда-Фалкерсона, направленные на снижение количества итераций при поиске максимального потока в ТС. Однако при решении задач подобного рода с помощью современных компьютеров количество итераций перестает

играть решающую роль в выборе метода. В силу того, что ненасыщенный путь на каждом шаге метода Форда-Фалкерсона может выбираться различными способами, то и распределение потока по участкам ТС в общем случае может быть различно. То есть для ТС существуют несколько вариантов распределения транзитного потока, величина которых будет максимальной. Поэтому можно найти максимальный поток ТС – лучший в определенном смысле и расширить классическую постановку задачи, введя понятие эффективности потока ТС.

Эффективность максимального потока оценивается интегральным показателем эффективности

$$F = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f_{ij}, \quad f_{ij} = \delta_1 * l_{ij} + \delta_2 * \frac{l_{ij}}{x_{ij}} + \delta_3 * q_{ij} * x_{ij}, \quad \sum_{i=1}^3 \delta_i = 1,$$

где $0 \leq \delta_i < 1$ определяют коэффициенты важности вклада доли i -того параметра (длины, времени и стоимости) в общий интегральный показатель. Наиболее эффективным будет считаться поток, имеющий минимальное значение F с учётом выбранных приоритетов.

Для поиска наиболее эффективного максимального потока предлагается использовать модифицированный алгоритм Форда-Фалкерсона, предполагающий выбор на каждой итерации ненасыщенного пути, обеспечивающего минимальное значение показателя F . Для выбора такого пути используется классический алгоритм поиска кратчайшего пути в графе [3], где в качестве исходных данных используются не длины ребер, а эффективности f_{ij} потока на ребрах. В силу того, что на каждой итерации метода Форда-Фалкерсона насыщается наиболее эффективный из возможных потоков, то и результирующий поток будет наиболее эффективным в смысле показателя F , при этом величина потока будет максимальной.

Более точное решение задачи о нахождении наиболее эффективного максимального потока получается в случае учёта влияния внутренних транспортных потоков на пропускную способность участков ТС. Для этого задаются функции распределения величин внутренних потоков на участках из i -ого узла ТС в j -ый $F_{ij}(\tau)$, в соответствии с которыми методом Монте-Карло определяется величина внутренних потоков участков. Она учитывается при нахождении значений пропускных способностей участков ТС на каждой l -ой реализации имитационного эксперимента с помощью модели IM_ATR. Далее при расчетах наиболее эффективного максимального потока ТС вместо пропускных способностей c_{ij} используются значения $c'_{ij} = c_{ij} - v_{ij}$, где v_{ij} – величина внутреннего потока на участке в l -ой реализации. По результатам имитационных экспериментов формируются выборки, включающие значения максимального потока φ_{\max} , эффективности потока F_{\min} и варианты его распределения в ТС $\|X_{\max}\|$ для заданного входа и выхода. Путем усреднения указанных элементов выборок определяются итоговые значения максимального потока $\overline{\varphi_{\max}}$, его эффективности $\overline{F_{\min}}$ и варианты распределения $\|\overline{X_{\max}}\|$.

В том случае, если в качестве объекта исследования рассматривается транзитный транспортный поток ТС, имеющий множество входов и множество выходов, то для определения

наиболее эффективного интегрального максимального потока и его распределения предлагается использовать специальный алгоритм, основанный на принципе суперпозиции для независимых транспортных потоков в одном и том же графе [4]. При этом для каждого отдельного транзитного транспортного потока решается задача определения наиболее эффективного максимального потока путём использования предложенной модификации алгоритма Форда-Фалкерсона.

4. Выбор варианта организации городской сети общественного транспорта

Особенностью транспортного потока городской сети является его сложный структурный состав. Он включает множество потоков: транзитные транспортные потоки, внутренние потоки индивидуального транспорта, потоки общественного транспорта и другие. Для обеспечения ритмичного функционирования всей транспортной системы города необходимо учитывать результат воздействия одного потока на другой и их взаимодействие с внешней средой. При этом, как правило, рассматриваются и анализируются параметры одного потока при неизменных параметрах других потоков, с учётом того, что часть ресурсов сети отводится на обслуживание этих потоков. Для определения наиболее рационального варианта организации городской сети общественного транспорта предлагается использовать ИМ IM_GTS.

Городская сеть общественного транспорта (ГСОТ) представляет собой типовой объект любого города, предназначенный для обслуживания пассажиропотоков ($PASS_{ir}$), где i -тип пассажира, r – номер остановки, на которой пассажир появился в ГСОТ и куда он возвратится в суточном цикле исследования. Маршруты общественного транспорта и перемещения пассажиропотоков описываются универсальными графовыми структурами (GR_1 и GR_2 соответственно). Вершинами этих графов являются остановки (OST_{ir} , где i – тип пассажира, r – тип остановки), на которых происходит посадка и высадка пассажиров в транспортные средства ($TRSR_{kj}$, где k – номер транспортного средства, движущегося по j -ой транспортной линии $MLIN_j$) ГСОТ. Ребрами графов являются участки дорог между соседними остановками, которые характеризуются длиной участка дороги (l_{mn}), и при наличии светофоров могут разделяться на участки движения (l_{smn} , где m, n – номера остановок, s – номер светофора). Следует отметить, что структура графов различна, а вершины графов совпадают и позволяют согласовать при моделировании два процесса. Процесс поступления пассажиров ($PASS_{ir}$, где i – тип пассажира, поступившего на r -ой остановке) на вход ГСОТ и их уход из ГСОТ согласуется с процессом их обслуживания множеством транспортных единиц $TRSR_{kj}$ во время их нахождения в сети. Множество пассажиропотоков $\{PASS_{ir}\}$ является внешней средой для ТС и складывается из множества возможных траекторий транспортного передвижения пассажиров. В эти траектории входят участки использования на j -х маршрутных линиях транспортных средств с номерами k $TRSR_{kj}$. Таким образом, множество маршрутных линий в совокупности составляет граф GR_1 , а множество траекторий перемещения пассажиров – GR_2 .

Граф GR_1 , отображающий ГСОТ, имеет иерархическую структуру. Он состоит из множества маршрутов $\{MLIN_j\}$, причём каждая $MLIN_j$ обслуживается множеством транспортных средств $\{TRSR_k\}$. Граф GR_2 , которым представляются траектории пассажиропотоков $PASS_{ir}$, также имеет иерархическую структуру. Имеются места проживания и работы, разделяющие граф траекторий GR_2 на микрорайоны. Каждому микрорайону соответствует множество мест поступления пассажиров в ГСОТ, которое совпадает с множеством остановок $\{OST_{ir}\}$. Пассажиры, поступающие на остановку с номером r , разделяются на типы.

Таким образом, ГСОТ рассматривается как многоуровневый объект графовой структуры, состоящий из множества маршрутных линий $MLIN_j$ с двухсторонним движением, реализуемым парком транспортных средств $TRSR_{kj}$. По ходу движения $TRSR_{kj}$ на $MLIN_j$ встречаются светофоры ($SVTF_{jk}$), регулирующие очередность пересечения $TRSR_{kj}$ перекрестков сети дорог.

На $MLIN_j$ расположено три типа остановочных станций OST_{ir} : конечных, обычных и пересадочных. На конечных остановках пассажиры либо поступают в ГСОТ, либо покидают ГСОТ. Пересадочные остановки являются местом пересечения транспортных маршрутов, на которых пассажиры меняют средство передвижения. Обычные – это промежуточные станции. Каждая OST_{ir} имеет порядковый номер (r) и номер маршрутной линии (j). Если OST_{ir} обслуживают несколько $MLIN_j$, то пассажиры обычно используют тот маршрут, который соответствует их траектории движения по ГСОТ.

ГСОТ обслуживает пассажиропотоки, обеспечивая перевозку пассажиров по $MLIN_j$. Пассажиры, поступающие на остановку с номером r , разделяются на типы, для которых характерны своя интенсивность поступления в ГСОТ и траектория движения по ГСОТ. Обобщенный вариант представления перемещения пассажирских потоков формируется с учётом траекторий движения отдельных пассажиров $PASS_{ir}$, которые задаются в маршрутной карте движения (MK_{ir}), где i – тип пассажира, r – номер остановки, на которой пассажир появился в ГСОТ, и куда он возвратится в суточном цикле исследования. Структура маршрутных карт зависит от типа маршрутных поездок пассажиров и наличия пересадок. В ней указывается список номеров обычных станций и станций пересадок пассажира при движении по ГСОТ от станции посадки до станции назначения. Между фазами обслуживания $PASS_{ir}$ ГСОТ предполагается отдых в месте проживания длительностью ($T_{отир}$) и нахождение на месте трудовой деятельности длительностью ($T_{рабир}$). В общем случае $T_{отир}$ и $T_{рабир}$, а также интенсивности поступления $PASS_{ir}$ в ГСОТ (λ_{ir}) являются случайными величинами. Характер движения пассажира в ГСОТ тоже является случайным. Однако, если отбросить редкие несущественные поездки пассажиров i -го типа, то зачастую можно выделить типовые направления транспортного передвижения пассажиров во всей ГСОТ и представить их с помощью обобщенной матрицы вероятностей траекторий движения от

остановки посадки к остановке высадки. На практике пассажиры ожидают приезда подходящего для передвижения транспортного средства в очереди. В транспортное средство $TRSR_{kj}$ из очереди на OST_{ir} поступает подмножество пассажиров в количестве, допустимом на момент заполнения $TRSR_{kj}$.

Транспортные средства $TRSR_{kj}$ имеют свой типовой алгоритм поведения, в который входят операции заполнения и освобождения транспортного средства на остановках; перевозки пассажиров между соседними остановками; реагирование на разрешающие/запрещающие сигналы светофора. Времена передвижения $TRSR_{kj}$ по $MLIN_j$ являются случайными величинами, зависящими от множества факторов: расписания движения, ситуации на дороге, количества обслуживаемых пассажиров, сигналов светофоров.

К параметрам IM_GTS относятся: маршрутные карты движения пассажиров i -го типа, поступивших в ГСОТ на r -ой остановке (MK_{ir}); характеристики функционирования и передвижения $TRSR_{kj}$; количественные характеристики маршрутных линий $MLIN_j$ (число маршрутов (J), множество остановок (R_j) и число светофоров (SV_j) на каждой линии, количество транспортных средств линии (K_j)). Все исходные характеристики IM_GTS определяются на основе статистического анализа результатов мониторинга потока пассажиров за суточный цикл функционирования реальной ГСОТ.

В результате проведения имитационных экспериментов вычисляются отклики, включающие: характеристики обслуживания пассажиров i -го типа, поступивших в ГСОТ на узлах OST_{ir} (время обслуживания, коэффициенты растяжения времени обслуживания пассажиров из-за их ожиданий в очередях и др.); характеристики эффективности работы транспортных средств $TRSR_{kj}$ (время движения транспортных средств, длительность остановок, наполняемость на интервалах движения между остановками); множество статистик, отображающих качество функционирования всей ГСОТ (наполняемость транспортных средств на маршрутных линиях, пропускная способность линий).

Использование IM_GTS позволяет получить текущие и прогнозные оценки для различных сценариев трансформации ГСОТ, обосновать выбор состава и количества транспортных единиц парка ГСОТ, разработать организационно-управленческие методы регулирования движения общественного транспорта.

5. Заключение

Рассмотрение в комплексе различных потоков ТС и автоматизация процесса их исследования путём имитационного моделирования позволяют расширить множество решаемых задач и на детальном уровне исследовать функционирование реальных ТС. Автоматизация процессов построения и эксплуатации ИМ ТС сократит сроки выполнения проектных работ при создании

автоматизированных систем управления ТС, будет способствовать их эффективному внедрению и использованию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизация этапов разработки и эксплуатации имитационных моделей транспортных систем / И.В. Максимей, Е.И. Сукач, Е.А. Ерофеева и др. // Проблемы программирования. – 2008. – № 4. – С. 104 – 111.
2. Левчук В.Д. Программно-технологические комплексы имитации сложных дискретных систем / В.Д. Левчук, И.В. Максимей. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2006. – 63 с.
3. Жогаль С.И. Задачи и модели исследования операций: Учебное пособие / С.И. Жогаль, И.В. Максимей. – Ч. 1: Аналитические модели исследования операций. – Гомель: БелГУТ, 1999. – 109 с.
4. Максимей И.В. Определение интегрального максимального потока в региональной сети с помощью имитационного моделирования / И.В. Максимей, П.В. Гируц, Е.И. Сукач // Математичні машини і системи. – 2008. – № 2. – С. 128 – 136.

Стаття надійшла до редакції 22.06.2009