

УДК 681.3

Е. И. Сукач, В. Н. Галушко, П. В. Гируц

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ ГОРОДСКОЙ СЕТИ

Для принятия решений, улучшающих транспортную ситуацию в городе, предлагается использовать комплексный подход, основанный на имитационном моделировании транспортных потоков различного уровня. Для оптимизации транзитных потоков решается задача определения наиболее эффективного максимального потока сети. Выбор варианта функционирования сети общественного транспорта реализуется путем моделирования взаимодействия пассажиропотока и потока транспорта.

Введение

Транспортные системы городов характеризуются рядом свойств, позволяющих отнести их к сложным системам, имеющим стохастический характер. Случайные времена поступления транспортных единиц в систему, неравномерность распределения транспорта по сети дорог, изменение направлений транспортных единиц в ходе перемещения приводит к резкому усложнению задач и увеличивает трудоемкость их решения.

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 учетом того, что часть ресурсов сети отводится на обслуживание этих потоков.

При исследовании транзитных транспортных потоков необходимо учитывать влияние внутренних транспортных потоков, которые могут рассматриваться как помехи при перемещении транспортных единиц из начального пункта сети в конечный и отнимать некоторый ресурс пропускной способности участков сети.

Потоки общественного транспорта также отнимают значительную часть ресурсов сети, обеспечивая при этом обслуживание пассажиропотоков. На характеристики функционирования общественного транспорта оказывают влияние потоки индивидуального транспорта. С одной стороны, они конкурируют за ресурсы сети при одновременном использовании маршрутных участков сети общественного транспорта. С другой стороны, косвенно влияют на загруженность общественного транспорта. Определение соотношения личного и общественного транспорта в настоящее время является актуальной задачей и требует исследования различных схем организации движения с целью уменьшения числа индивидуальных автомобилей на дорогах и увеличения экологически чистого общественного транспорта.

Для принятия решений, позволяющих учесть случайный характер функционирования городской транспортной сети (ГТС) и многообразие составляющих ее потоков, предлагается использовать комплекс имитационных моделей (ИМ) объектов графовой структуры [1], обеспечивающий процесс исследования ГТС без знания технологических аспектов программирования и позволяющий оперативно провести исследования путем использования одной из моделей, модифицированной с учетом имеющихся данных и критериев поиска вариантов организации транспортного процесса.

Имитационная модель автомобильных транзитных потоков (ИМ_АТР) предназначена для определения интегрального максимального потока и наиболее эффективного варианта распределения этого потока в сети с учетом наличия множества входов и выходов исследуемой сети.

Имитационная модель обслуживания пассажиропотоков сетью общественного транспорта (ИМ_ГТС) позволяет согласовать во времени и в пространстве перемещение пассажиров и транспортных средств, оценить стоимость проезда и объемы перевозок.

Моделирование транзитных транспортных потоков

При исследовании транзитных потоков ГТС необходимо 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 учетом наличия внутренних потоков на участках сети.

ГТС представляется графом $G(U, N)$. Множество участков сети определяется множеством ребер $\{U\}$. Пересечения дорог определяют размерность графа и задают множество узлов $\{N\}$. Каждое ребро графа описывается следующими характеристиками:

- пропускной способностью дороги между узлами ГТС (c_y);
- длиной дороги между узлами ГТС (l_y);
- стоимостью перемещения одной транспортной единицы по дороге между узлами ГТС (q_y);
- величиной потока на дороге между узлами ГТС (x_y).

Пропускная способность участка ГТС определяется максимальным количеством транспортных средств, которое он способен пропустить за единицу времени. Длина дороги задается 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 ГТС 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 [2]. 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 равна 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.

Существует много модификаций алгоритма Форда – Фалкерсона, направленных, главным образом, на снижение количества итераций при поиске максимального потока в ГТС. 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 распределение потока по участкам ГТС в общем случае может быть различно. То есть, для ГТС существует несколько вариантов распределения транзитного потока, величина которых будет максимальной. В этом случае имеет смысл говорить о выборе максимального потока ГТС – лучшего в определенном смысле. Поэтому предлагается расширить классическую постановку задачи, введя понятие эффективности потока ГТС.

Эффективность максимального потока оценивается суммарным показателем эффективности:

$$F = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f_{ij}, \quad f_{ij} = \delta_1 * \frac{1}{l_{ij}} + \delta_2 * \frac{l'_{ij}}{x_{ij}} + \delta_3 * q'_{ij} * x_{ij}, \quad \text{где } 0 \leq \delta_i < 1 \text{ определяют коэффициенты важности вкла-}$$

да доли i -го параметра (длины, скорости и стоимости) в общий интегральный показатель, причем

$$\sum_{i=1}^3 \delta_i = 1. \text{ Наиболее эффективным будет считаться поток, имеющий минимальное значение } F \text{ с учетом}$$

выбранных приоритетов.

Для поиска наиболее эффективного максимального потока предлагается на каждом шаге в методе Форда – Фалкерсона из ненасыщенных путей выбирать путь, обеспечивающий минимальное значение показателя F . С этой целью применяется алгоритм поиска кратчайшего пути в графе [2], 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.

В том случае, если в качестве объекта исследования рассматривается транзитный транспортный поток ГТС, имеющий множество пунктов отправления и множество пунктов назначения, то для определения наиболее эффективного интегрального максимального потока предлагается использовать специальный алгоритм, основанный на принципе суперпозиции для независимых транспортных потоков в одном и том же графе [3]. При этом для каждого отдельного транзитного транспортного потока решается задача определения наиболее эффективного максимального потока путем использования предложенной модификации алгоритма Форда – Фалкерсона.

Наконец, наиболее полное решение задачи о нахождении эффективного максимального потока получается в случае учета влияния внутренних транспортных потоков на пропускную способность участков ГТС. Для этого задаются функции распределения величин внутренних потоков на участках из i -го узла ГТС в j -й $F_{ij}(\tau)$, в соответствии с которыми методом Монте-Карло определяется величина внутренних потоков участков [4]. Она учитывается при нахождении значений пропускных способностей участков ГТС на каж-

дой l -й реализации имитационного эксперимента с помощью модели IM_ATR. Далее при расчетах наиболее эффективного максимального потока ГТС вместо пропускных способностей c_y используются значения $c'_y = c_y - v_y$, где v_y – величина внутреннего потока на участке в l -й реализации. По результатам имитационных экспериментов формируются выборки, включающие значения максимального потока $\varphi_{\max}$, эффективности потока $F_{\max}$ и варианты его распределения в ГТС $\|X_{\max}\|$ для заданного входа и выхода. Путем усреднения указанных элементов выборок определяются итоговые значения максимального потока $\overline{\varphi_{\max}}$, его эффективности $\overline{F_{\max}}$ и варианта распределения $\|\overline{X_{\max}}\|$.

Таким образом, задача о поиске максимального потока может решаться для ГТС со множеством входов и множеством выходов. При этом, предложенный метод позволяет определить интегральный максимальный поток для нескольких потоков и его распределение в заданном направлении, учитывая случайный характер пропускных способностей, изменяющих свою величину в зависимости от внешних воздействий на сеть. При этом результирующий поток будет не просто максимальным потоком в ГТС, но и лучшим по эффективности.

Моделирование городской сети общественного транспорта

Городская сеть общественного транспорта (ГСОТ) представляет собой типовой объект любого города, предназначенный для обслуживания пассажиропотоков ($PASS_r$), 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 структурами, которые можно представить в виде графов (GR_1 и GR_2 соответственно). Вершинами этих графов являются остановки транспортных средств (OST_r), на которых происходит посадка и высадка пассажиров в транспортные средства ($TRSR_k$), где k – номер транспортного средства, движущегося по j -й транспортной линии ($MLIN_j$) ГСОТ. Ребрами графов являются участки дорог между соседними остановками. Ребра характеризуются длиной участка дороги (l_{mn}) и при наличии светофоров могут разделяться на участки движения длиной l_{mns} (m, n – номера остановок, s – номер светофора). Следует отметить, что вершины обоих графов OST_r совпадают и позволяют согласовать во времени и пространстве два процесса. Процесс поступления $\{PASS_r\}$ на вход ГСОТ и их уход из ГСОТ согласуется с процессом обслуживания $\{PASS_r\}$ множеством $\{TRSR_k\}$ во время нахождения элементов пассажиропотока в ГТС. Структура графов различна. Множество пассажиропотоков $\{PASS_r\}$ является внешней средой для ГТС 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 $TRSR_k$. 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 $\{MLIN_j\}$, причем каждая $MLIN_j$ обслуживается множеством транспортных средств $\{TRSR_k\}$. Граф GR_2 , которым представляются траектории пассажиропотоков $PASS_r$, 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 $\{OST_r\}$. 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 $TRSR_k$. По ходу движения $TRSR_k$ на $MLIN_j$ встречаются светофоры ($SVTF_{jk}$), регулирующие очередность пересечения $TRSR_k$ перекрестков сети дорог.

На $MLIN_j$ расположено три типа остановочных станций OST_r : 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_r имеет порядковый номер (r) и номер маршрутной линии (j). Если OST_r 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 характерна своя интенсивность поступления в ГСОТ и траектория движения по ГСОТ. Обобщенный вариант представления перемещения

пассажирских потоков формируется с учетом траекторий движения отдельных пассажиров $PASS_{ir}$, которая задается 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 ($\tau_{отпг}$) и нахождение на месте трудовой деятельности длительностью ($\tau_{рабгг}$). В общем случае $\tau_{отпг}$ и $\tau_{рабгг}$, 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 и пересадки к остановке высадки. На практике пассажиры ожидают приезда подходящего для передвижения транспортного средства в очереди. В транспортное средство $TRSR_k$ из очереди на OST_{ir} поступает подмножество пассажиров в количестве допустимом на момент заполнения $TRSR_k$.

Транспортные средства $TRSR_k$ имеют свой типовой алгоритм поведения, в который входят операции: заполнения и освобождения транспортного средства на остановках; перевозки пассажиров между соседними остановками; реагирование на разрешающе-запрещающие сигналы светофора. Времена передвижения $TRSR_k$ 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 MK_{ir} движения пассажиров i -го типа по $MLIN_j$ в суточном цикле имитации, которые поступают в ГСОТ на r -й остановке j -й маршрутной линии до места их работы и возврат обратно с места работы через ГСОТ к месту проживания;
- характеристики функционирования и передвижения $TRSR_k$;
- количественные характеристики, определяющие число маршрутных линий (J), множество остановок (R_j) на каждой $MLIN_j$, количество светофоров (SV_j) на каждой линии, количество транспортных средств (K_j).

Все исходные характеристики IM_GTS определяются на основе статистического анализа результатов мониторинга потока пассажиров за суточный цикл функционирования реальной ГСОТ и последующего измерения характеристик ГСОТ.

Статистики имитации, на основе которых вычисляются отклики имитационного моделирования, включают:

- статистики обслуживания пассажиров i -го типа, поступивших в ГСОТ на узле OST_{ir} ;
- время обслуживания пассажиров каждого типа;
- коэффициенты растяжения времени обслуживания пассажиров i -го типа из-за их ожиданий в очередях на OST_{ir} ;
- характеристики эффективности работы транспортных средств: заполняемость $TRSR_k$ на интервалах между посадками-высадками пассажиров; длительности посадки и высадки; интервалы времени движения транспортного средства;
- множество статистик, отображающие качество функционирования всей ГСОТ: заполняемость транспортных средств на маршрутных линиях; пропускная способность линий ГСОТ.

Использование IM_GTS обеспечивает решение следующих задач проектного моделирования ГСОТ: получения текущих и краткосрочных прогнозных оценок для различных сценариев трансформации системы общественного транспорта; обоснования изменения состава и количества парка транспортных единиц; разработки организационно-управленческих технологий и методов регулирования движения общественного транспорта.

Заключение

Рассмотрение в комплексе различных потоков городской сети и автоматизация процесса их исследования путем имитационного моделирования позволяют расширить множество решаемых задач и на детальном уровне исследовать функционирование реальных ГТС. Автоматизация процессов построения и эксплуатации ИМ ГТС сократит сроки выполнения проектных работ при создании автоматизированных систем управления ГТС, будет способствовать их эффективному внедрению и использованию.

Литература

1. Максимей, И. В. Проектное моделирование технологии обслуживания пассажиропотока городской транспортной сетью / И. В. Максимей, Е. И. Сукач, В. Н. Галушко // Проблемы управления и информатики. – 2009. – № 1. – С. 70–82.
2. Задачи и модели исследования операций. Ч. 1. Аналитические модели исследования операций: учеб. пособие / И. В. Максимей, С. И. Жогаль, под общ. ред. И. В. Максимей. – Гомель : БелГУТ, 1999. – 109 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). – 2008. – Т. 10, № 1. – С. 49–58.
4. Максимей, И. В. Имитационное моделирование на ЭВМ – М. : Радио и связь, 1983. – 230 с.

Сукач Елена Ивановна, доцент кафедры математических проблем управления Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины, кандидат технических наук, доцент, elena.sukach@mail.ru

Гируц Павел Викторович, ассистент кафедры математических проблем управления Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины, pgiruts@tut.by

Галушко Виктор Николаевич, ассистент кафедры электроники Белорусского государственного университета транспорта, 5355628@mail.ru