

УДК 681.3

Е. И. Сукач

УО «Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины»
ул. Советская 104, 246019 Гомель, Республика Беларусь

Метод перераспределения автомобильных транспортных потоков региона на основе имитационного моделирования

Предложен стенд имитационного моделирования транспортных систем, позволяющий контролировать и прогнозировать состояние дорожной сети и автоматизирующий процесс управления транзитными транспортными потоками региона в условиях случайных воздействий.

Ключевые слова: имитационные модели, транзитные транспортные потоки, транспортная сеть.

Введение

При движении по сети дорог региона транспортные средства образуют направленные транспортные потоки (ТП), существенную часть которых составляют транзитные потоки, движущиеся в различных направлениях. Для нахождения рациональных вариантов их распределения необходимо: оценить максимальный поток в сети, выявить «узкие места» в сети и выдать рекомендации по их своевременной ликвидации. Однако, эксплуатация дорог в условиях обеспечения максимального потока в сети, может приводить к быстрому износу дорог и требовать дополнительных средств на их ремонт и восстановление. Отсюда вытекает задача нахождения такой стратегии управления транзитными ТП региона, при которой, с одной стороны, рациональна загруженность дорог, а с другой стороны, структурная организация дорог адаптирована к обслуживанию предполагаемого ТП.

Для решения этой задачи предполагается использовать системный подход к управлению транспортной системой (ТС), включающий в себя: управление оперативной организацией ТС в реальном масштабе времени; управление развитием ТС для обеспечения освоения заданной нагрузки на ТС с поиском наилучших показателей надежности и безопасности работы и, в конечном итоге, выборе наилучших экономических показателей и прибыли. Оперативное управление ТП и управление развитием ТС тесно взаимосвязаны. В случаях отставания развития ТС от роста нагрузки на нее и передовых технологий организации дорожного движения оперативное управление усложняется. Поэтому ТС начинает работать со сбоями, задержками пропуска транспорта через ТС. С другой стороны, поиск наилучших решений развития ТС невозможен без анализа множества реальных

© Е. И. Сукач

оперативных ситуаций, определяющих многовариантность этого развития.

Управление дорожным движением на компьютерной основе нуждается в эффективных математических моделях ТП, способных адекватно прогнозировать состояние дорожной сети. Аналитические модели позволяют определить варианты распределения транзитного потока при условии постоянной величины и структуры ТП на входах сети, сохраняемости эксплуатационных характеристик сети, неизменности структуры сети в процессе ее функционирования [1]. Рассмотрение функционирования ТС в динамике и учет случайных факторов, определяющих изменение всей сети, требуют использования имитационных моделей.

Имитационное моделирование ТС может использоваться, как при проектном моделировании ТП сети автомобильного транспорта, так и при эксплуатации ТС, как инструмент контроля и управления самим процессом функционирования ТС. Для организации своевременного анализа текущей транспортной ситуации и принятия решения о перераспределении ТП предлагается использовать стенд имитационного моделирования ТС региона, включающий следующие компоненты: имитационную модель (ИМ) ТС, предназначенную для нахождения рациональных вариантов распределения потока автомобилей при реализации максимального потока [2]; логико-вероятностную модель (ЛВМ) ТС, обеспечивающую вероятностную оценку эксплуатационных характеристик вариантов структурной организации транспортной сети и выбор режима ее обслуживания [3]; систему анализа транспортной ситуации и принятия решения; информационную базу данных (БД) исследуемой ТС [4]; систему контроля ходом имитации и отображения результатов моделирования.

Особенности формализации транспортной системы региона

ТС описывается графом $G(N, U)$, узлами которого являются населенные пункты (N), в которых транзитный поток может изменить направление. Ребра графа (U), представляющие участки дорог, имеют следующие характеристики: пропускную способность (c_{ij}) (количество транспортных средств, которое дорога способна пропустить в некоторую определенную единицу времени), длину (l_{ij}), заданную в условных единицах, стоимость перемещения по ребру одного транспортного средства (q_{ij}). Характеристики каждой из дорог задаются соответствующими матрицами: $C = \|c_{ij}\|$, $L = \|l_{ij}\|$, $Q = \|q_{ij}\|$, где $i, j = 1, \dots, N$.

Объектом управления является ТП, движущийся по сети и имеющий свою структуру. Величина потока определяется количеством транспортных средств, которые движутся по сети в заданном направлении. ТП состоит из множества транзитных потоков, имеющих свои входы и выходы (крайние узлы сети), что определяет структуру потока сети. Кроме этого, в транспортной сети существуют внутренние потоки, которые отнимают некоторую часть ресурсов сети, уменьшая тем самым величину пропускных способностей участков. Каждый ТП определяется совокупностью следующих характеристик: множеством входов в сеть $\{Z_i\}$, $i = 1, \dots, M$, где M — количество входов сети; множеством выходов из сети $\{Y_j\}$, $j = 1, \dots, W$, где W — количество выходов сети; величиной потока φ ; распределе-

нием потока по участкам сети $X = \|x_{ij}\|$; интегральным показателем эффективности потока F , величина которого определяется по формуле:

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

где $\delta_i \in [0;1]$ — коэффициенты важности вклада доли соответствующего параметра в общий интегральный показатель. Величина внутренних ТП для ij -х участков сети задается функциями распределения вероятностей времени движения по участкам $H_{ij}(\tau)$.

При реализации имитационных экспериментов (ИЭ) с моделью сети формируются значения: максимального потока $\|\overline{\varphi_{zy}}\|$, эффективности максимального потока $\|\overline{F_{zy}}\|$, распределения потока по ветвям ТП $\overline{X_{zy}} = \left\| \sum_{zy} \overline{x_{ijzy}} \right\|$ в направлении ZY .

Неоднородность исследуемой транспортной сети, которая обусловлена, во-первых, различными техническими характеристиками участков сети, во-вторых, различными условиями эксплуатации отдельных участков (различные климатические и погодные условия), в-третьих, интенсивностью движения транспорта на каждом участке сети, требует выделения схожих участков с целью исследования характеристик их износа и оценки влияния полученных статистик на износ всей сети. Процесс износа, которому подвержены участки дорог влияет на их пропускную способность, приводит к износу транспортных средств и повышает уровень аварийности в сети. На начальных этапах эксплуатации ТС возможно восстановление первоначального состояния участков дороги, которое характеризуется сочетанием определенных значений эксплуатационных параметров (скользкость, изношенность, ровность, прочность). Как правило, восстановление участков дорог реализуется в режиме ограниченного функционирования участков (путем проведения текущих ремонтов). При достижении определенного уровня износа дорога не пригодна для эксплуатации, требует ремонта, и движение по этой дороге прекращается.

Для исследования процесса износа дорог используется аппарат цепей Маркова [3]. При этом вся сеть разбивается на группы участков дорог, однородных по техническим характеристикам и условиям эксплуатации. Для выделенного множества групп участков дорог подбираются параметры цепей Маркова, описывающих процессы износа дорог, и строится группа моделей $\{MM_d\}$. Процесс износа является непрерывным физическим процессом, в котором выделяется ряд состояний, характеризующихся множеством сочетаний значений параметров, определяющих износ. Состояния износа дискретны и обозначаются в виде последовательности S_1, S_2, \dots, S_b . Входными параметрами моделирования являются: вектор вероятностей состояний участка в начальный момент времени $p_0 = (p_1, p_2, p_3, \dots, p_{b-1}, 0)$ и матрица переходных вероятностей $P = \|p_{ij}\|$, где $i, j = 1, \dots, b$. В резуль-

тате работы группы моделей $\{MM_d\}$ для каждой из выделенных групп участков формируется множество векторов вероятностей $P_d = \{\|P_d^t\|\}$, характеризующих процесс накопления повреждений во времени отдельных участков.

Для оценки износа всей сети используется ЛВМ, на вход которой подается граф сети и наборы полученных векторов вероятностей, характеризующих процессы износа участков сети. Путем использования различных функций, позволяющих учесть при моделировании сети как неопределенность данных, задаваемых векторами вероятностей состояний участков сети, так и неопределенность операций, задающих взаимосвязи между компонентами сети, формируется результирующее множество векторов вероятностей $P_{sist} = \{\|P_{sist}^t\|\}$, позволяющее проследить за изменением характеристик износа рассматриваемой сети во времени, которое по своей природе также является вероятностным.

Состав и структура стенда имитационного моделирования транспортных систем региона

Стенд имитационного моделирования ТС состоит из следующих компонентов: параметризованной имитационной модели ТС; настраиваемой логико-вероятностной модели ТС; системы анализа транспортной ситуации и принятия решения; базы данных исследуемой транспортной сети; системы контроля хода имитации и отображения результатов моделирования.

Имитационная модель ТС, реализующая имитацию на основе сочетания алгоритма Форд-Фалкерсона, процедуры Монте-Карло и использования принципа суперпозиции независимых ТП в одном и том же графе, представляет собой объединение семи процедур, каждая из которых реализует технологию использования ИМ для решения задачи исследования вероятностных ТП сети.

Процедура занесения исходной информации о моделируемом объекте в БД ТС (*PR.ZAPIT*) организует автоматическое заполнение параметров ТС. При этом определяется структура сети $G(N, U)$, вводятся значения матриц $C = \|c_{ij}\|$, $L = \|l_{ij}\|$, $Q = \|q_{ij}\|$, $X = \|x_{ij}\|$, определяется множество входов и выходов для исследуемого направления, которое обозначается ZY . Вводится также матрица $V = \|v_{ij}\|$, элементами которой являются функции распределения внутренних потоков $H_{ij}(\tau)$ участков сети.

Процедура реализации метода Монте-Карло (*PR.MONTEC*) в соответствии с функциями распределения внутренних потоков $H_{ij}(\tau)$ определяет значения матрицы величины внутренних потоков для l -й ($l = 1, \dots, L$) реализации ИЭ V_l .

Процедура корректировки пропускных способностей (*PR.FOPROP*) с учетом значений матрицы V_l определяет значения матрицы пропускных способностей сети для l -й реализации ИЭ C_l .

Процедура реализации алгоритма Форда-Фалкерсона (*PR.FORFAL*) для очередной l -й реализации процедуры Монте-Карло определяет значения максималь-

ных потоков $\|\varphi_{zy}^k\|$ и распределения этих потоков по ветвям ТС $\|X_{zy}^k\|$ ($k = 1, \dots, K$) для различных сочетаний входов и выходов, число которых равно числу транзитных потоков K исследуемого направления. Полученные отклики запоминаются в БД ТС в качестве элементов выборок статистик имитации с использованием процедуры сбора и обработки статистики (*PR.STAT*).

Процедура управления процессом моделирования (*PR.YPRMOD*) в соответствии с планом ИЭ организует цикл из L итераций метода Монте-Карло. По завершении L итераций в БД ТС находятся выборки статистик для различных сочетаний входов и выходов исследуемого направления по значениям максимальных потоков и их распределениям по ветвям сети.

Процедура сбора и обработки статистики (*PR.STAT*) считывает из БД ТС значения сформированных выборок статистик, по которым вычисляет средние значения и выборочные дисперсии откликов моделирования. Результатом ее работы являются оценки средних значений статистик максимального потока $\|\overline{\varphi_{zy}^k}\|$ и их распределений $\|\overline{X_{zy}^k}\|$, в соответствии с которыми определяются показатели выгоды максимальных потоков $\|\overline{F_{zy}^k}\|$ в исследуемом направлении ZY . Эти статистики имитации запоминаются в БД ТС.

Процедура определения интегрального максимального потока (*PR.INTEGR*) организует поиск наиболее эффективного варианта организации интегрального максимального потока $\varphi_{zy}^?$, обеспечивающего минимальные затраты на перемещение транспорта в заданном направлении. При этом по исследуемому направлению анализируются значения двух матриц $\|\overline{\varphi_{zy}^k}\|$ и $\|\overline{F_{zy}^k}\|$.

Работа ЛВМ ТС, в основу создания которой положена концепция многоуровневого представления объекта исследования и поэтапное использование комплекса процедур, реализует основные этапы моделирования.

Процедура занесения начальных данных моделирования в БД ТС (*PR.INIT*) организует автоматическое задание структуры сети $G(N, U)$, а также заполнение эксплуатационных и технических характеристик исследуемой сети, определяющих состояния дорог. Для выбранной структуры сети вводятся значения матриц, определяющих коэффициенты скользкости, изношенности, ровности, прочности в дискретные моменты времени $t = 1, \dots, T$, соответственно $SK^t = \|sk_{ij}^t\|$, $IZ^t = \|iz_{ij}^t\|$, $R^t = \|r_{ij}^t\|$, $PR^t = \|pr_{ij}^t\|$.

Процедура разбиения участков сети на группы (*PR.RAZB*) на основе сравнительного анализа занесенных в БД ТС параметров участков сети формирует множество групп, схожих по характеристикам и условиям эксплуатации участков $\{GR_d\}$, где d — количество выделенных групп.

Процедура построения комплекса моделей для выделенных групп участков $\{GR_d\}$ сети (*PR.SOSD*) реализует алгоритм подбора параметров моделей $\{MM_d\}$, отображающих процессы износа отдельных участков дорог, которые описываются стационарными поглощающими цепями Маркова. Для этого используются из-

меняющиеся во времени значения коэффициентов эксплуатационных характеристик групп участков и формируются значения матриц переходных вероятностей $P^d = \|p_{ij}^d\|$, $i, j = 1, \dots, b$ (b — число состояний участка сети).

Процедура организации моделирования на первом уровне (*IM.MARK*) реализует имитационное моделирование с использованием библиотеки моделей $\{MM_i\}$, формирует векторы вероятностей нахождения участков дорог в определенных состояниях и заносит полученные статистики в БД ТС.

Процедура организации моделирования на втором уровне (*IM.LOGIC*) реализует моделирование ТП с учетом заданной структуры сети. При этом автоматически происходит преобразование к эквивалентной форме графа с параллельными и последовательными соединениями. Используя информацию, полученную на первом уровне моделирования, процедура формирует результирующие векторы вероятностей, характеризующие изменение состояния всей сети во времени, и заносит результаты расчетов в БД ТС.

Процедура управления моделированием (*PR.YPR*) задает время моделирования, организует сбор и передачу результатов моделирования в БД ТС, а также извлечение необходимых данных для проведения моделирования на выбранных уровнях моделирования.

Важное место при решении задачи управления распределением интегрального ТП отводится системе анализа транспортной ситуации и принятия решений (*OPTIM*), которая включает следующие компоненты: блок управления ИМ ТС и учета величины установившегося ТП; блок управления логико-вероятностной моделью ТС и учета текущей транспортной ситуации; блок анализа результатов моделирования и принятия решений.

База данных ТС (*BD_YPR*) первоначально заполняется при установке параметров моделей стенда имитации и содержит формализованную информацию о структуре и параметрах исследуемой ТС, а также данные, полученные от эксперта в области эксплуатации дорог об особенностях и технических характеристиках участков сети: множество параметров, определяющих уровень износа $\{IZN\}$; уровень аварийности за истекший период времени Δt_1 ($AV = \|av_{ij}\|$); предполагаемое время эксплуатации до очередного ремонта ($T^p = \|t_{ij}^p\|$). С учетом особенностей исследуемой сети эксперт в автоматическом режиме формирует группы правил, управляющие процессом моделирования и определяющие: влияние перехода участков сети в аварийное (критическое) состояние, на процесс моделирования соседних участков сети; изменение пропускной способности (стоимости перемещения транспортной единицы) участка в зависимости от изменения значений вектора вероятностей состояний участка сети; перераспределение нагрузки на сеть в результате аварийности участков сети.

Система контроля хода имитации и отображения результатов моделирования (*VIZUAL*) включает множество процедур, облегчающих процесс восприятия параметров и результатов моделирования.

Процедура визуализации графа сети и отображения атрибутов ребер и узлов (*PR.VIZ*) отображает граф исследуемой сети и указывает все атрибуты вершин и дуг графа, используя информацию, занесенную пользователем в БД ТС. Изображение графа, сформированное алгоритмом рисования, можно корректировать, пе-

рещающая вершины, добавляя и удаляя ребра. После такой корректировки полученный граф сохраняется в БД. При этом автоматически корректируется соответствующая информация в БД ТС. Масштаб изображения графа можно менять от 1 до 100 %. При этом значения параметров элементов графа изображаются только при максимальном масштабе его представления. Полезной возможностью стенда является открытие отдельного окна, содержащего обзорный вид графа с прямоугольником, ограничивающим видимую в обычном окне часть графа.

Процедура контроля хода имитации (*PR.MONIT*) отображает на графе ТС текущие данные моделирования. С интервалом Δt_1 происходит выделение цветом участков дорог, функционирующих в режиме периодических профилактических ремонтов, и дорог, находящихся в аварийном состоянии. На основании этой информации корректируются данные структуры графа и параметров ИМ в БД ТС. С интервалом Δt_2 отображается информация о наиболее эффективном варианте распределения ТП. При необходимости могут быть просмотрены данные об альтернативных вариантах распределения ТП.

Процедура отображения результатов моделирования (*PR.REZULT*) строит графики и диаграммы изменения статистик ИМ ТС, а также обеспечивает просмотр динамики изменения функций распределения состояний участков сети и всей сети.

Автоматизация процесса управления транзитными потоками с помощью стенда имитации транспортных систем

Работа стенда имитации и контроля предполагает формирование управляющих воздействий в режиме реального времени на объекты ТС. Для этого в системе должна функционировать обратная связь, обеспечивающая автоматическую передачу оперативных данных о работе объектов ТС в систему анализа транспортной ситуации и принятия решения *OPTIM*, которая взаимодействует с ИМ ТС, используя алгоритмы анализа вариантов организации интегрального максимального потока в сети для установившейся интенсивности потока транспортных средств и его состава. С другой стороны, она взаимодействует с ЛВМ ТС, и путем обработки вероятностных характеристик износа ТС реализует корректировку параметров сети и ее структуры. Наконец, *OPTIM* непрерывно обращается к базе данных *BD_YPR* для организации управления ходом моделирования, получения и обновления текущей информации, выработки программы перераспределения ТП.

На первом этапе организуются эксперименты с ИМ ТС, параметры которой настроены с учетом информации, занесенной в БД экспертом на подготовительном этапе настройки системы. В результате определяется возможный максимальный поток сети с учетом заданных эксплуатационных характеристик сети, которые определяют пропускные способности участков ТС, и формируются статистики, определяющие множество вариантов $\{V_1, \dots, V_K\}$ выбора значения максимального потока $\|\overline{\varphi}_{zy}^k\|$, эффективности максимального потока $\|\overline{F}_{zy}^k\|$ и распределения ТП по участкам сети $\overline{X}_{zy} = \left\| \sum_{zy} x_{ijzy}^k \right\|$ в направлении *ZY*. Варианты упорядочены по

эффективности.

Одновременно реализуется логико-вероятностное моделирование комплексом моделей, параметры которых подобраны с учетом информации БД о характеристиках различных участков сети. Для получения статистик моделирования реализуются ИЭ с моделями участков сети $\{MM_i\}$ на временном интервале Δt_1 . При этом множество всех состояний износа участков дорог разбивается на следующие группы: состояния дорог в аварийном состоянии $\{S_a\}$; состояния дорог, когда возможно проведение профилактических ремонтных работ по их восстановлению $\{S_v\}$; промежуточные состояния $\{S_p\}$. По усредненным статистикам работы цепи Маркова согласно методу Монте-Карло для исследуемых групп участков дорог формируются векторы вероятностей нахождения дорог в каждом состоянии на интервале Δt_1 . В результате анализа этих векторов для дискретных моментов времени на интервале Δt_1 с учетом наиболее вероятных состояний определяются значения признаков аварийности участков дороги α_{ij} . При $\alpha_{ij} = 1$ считается, что участок дороги требует длительного ремонта. При $\alpha_{ij} = 2$ дорога продолжает функционировать в режиме периодических профилактических ремонтов. Если значение признака $\alpha_{ij} = 0$, участок продолжает функционировать в обычном режиме. В том случае, если значение признака $\alpha_{ij} \neq 0$ в соответствии с правилами БД принимаются решения по модификации структурной организации сети и корректировке нагрузки. При аварийном состоянии дороги по функции распределения разыгрывается время, необходимое для проведения ремонтных работ (t_p). На этот период соответствующее ребро графа исключается из структурного описания сети. В случае перехода участка в критическое состояние ($\alpha_{ij} = 2$), корректируются параметры модели, описывающей его функционирование (осуществляется переход к модели с восстановлениями). На более высоком уровне моделируется вся ТС и для дискретных моментов времени на интервале Δt_1 формируются векторы вероятностей состояний сети. С учетом полученных значений признаков α_{ij} аварийности участков для каждого момента времени определяется признак аварийности всей сети α_s , на основе которого делаются выводы о возможности функционирования сети.

Для управления ТП в БД ТС через фиксированные интервалы времени (Δt_2) поступает информация о величине потока на входах сети. Далее подсистема *ОПТИМ* с учетом величины максимального потока и вариантов его организации реализует алгоритм выбора наиболее эффективного варианта [2] и определяет распределение текущего интегрального потока по сети.

Результаты логико-вероятностного моделирования отражают процессы износа отдельных участков и всей сети через интервалы времени Δt_1 . В результате обработки статистики подсистема *ОПТИМ* через указанные интервалы времени с использованием правил БД ТС корректирует значения пропускных способностей участков и модифицирует структуру всей сети. Полученные данные заносятся в БД и далее используются в процессе нахождения максимального потока в сети с помощью ИМ ТС.

Предполагается, что $\Delta t_1 > \Delta t_2$, и поэтому логико-вероятностное моделирование реализуется с опережением и определяет моменты модификации характеристик сети, на основании которых вычисляется максимальный поток и принимается решение о распределении текущего ТП.

Заключение

С помощью описанного стенда имитации и контроля специалист в области управления ТП может исследовать ТС и обосновать стратегию перераспределения транспортных потоков, обеспечивающую равномерное распределение нагрузки на сеть, повышающую уровень безопасности движения на дорогах региона и уменьшающую износ дорог и транспортных средств. При этом он имеет возможность остановить процесс имитационного моделирования, изменить параметры ТП, модифицировать структуру исследуемой транспортной сети, перевести определенные участки сети в режим профилактического ремонта, исключить из рассмотрения аварийные участки дорог, изменить эксплуатационные и технические характеристики участков сети, что не представляется возможным при исследовании поведения реального объекта исследования. У него также появляется возможность проектного моделирования актуальных транспортных ситуаций, часто встречающихся в реальных ТС. Типовыми задачами в этом случае могут быть следующие: определение пропускной способности вариантов организации сети при установленном интегральном транспортном потоке (задача 1); поиск «узких» мест в ТС с учетом процесса износа участков сети (задача 2); выбор рационального варианта распределения транспортных потоков с точки зрения выбранного критерия (задача 3); установление оптимальной структуры транспортной сети с учетом вероятностных характеристик износа всей сети и отдельных ее секторов (задача 4).

Высокий уровень автоматизации исследований в технологической среде стенда имитации ТС, а также включение профессиональных знаний специалиста-предметника для поиска решений при контроле транспортной ситуации и анализе состояния дорог, позволят значительно повысить эффективность управления ТП и перевести функционирование ТС на качественно новый уровень.

1. *Зайченко Ю.П.* Исследование операций / Ю.П. Зайченко. — К.: Издат. дом «Слово», 2002. — 320 с.

2. *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 оброб. даних. — 2008. — Т. 10, № 1. — С. 49–58.

3. *Сукач Е.И.* Использование логико-вероятностного моделирования для исследования характеристик транспортной сети / Е.И. Сукач // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. — 2007. — № 5 (44). — С. 77–81.

4. *Максимей И.В.* Средства технологической поддержки имитационного эксперимента / И.В. Максимей, Е.И. Сукач. — Гомель: ГГУ им. Ф.Скорины, 2002. — 107 с.

Поступила в редакцию 23.06.2008