

УДК 681.3

Применение имитационного моделирования для исследования динамики транспортных потоков региона

Е. И. СУКАЧ

Введение

Значительное увеличение транспортного потока в региональной сети дорог приводит к необходимости управления им с целью рациональной организации движения транспорта на каждом отрезке пути. Скорость движения транспортной единицы зависит от многих факторов, среди которых наиболее важными являются загруженность участков пути, состояние дорожного покрытия, условия внешней среды. Загруженность на различных участках дороги различна и зависит от наличия внутренних транспортных потоков на данном участке, которые могут рассматриваться как помехи при передвижении транзитной транспортной единицы из начального пункта сети в конечный пункт. Состояние дороги определяется её изношенностью, условиями эксплуатации, влиянием погодных условий. Параметры внешней среды изменяются в зависимости от времени года, времени суток и подвержены влиянию погодных воздействий. В реальной транспортной сети перечисленные факторы являются взаимосвязанными.

При управлении потоками в транспортной сети, как правило, находят оптимальное распределение транспортного потока по ветвям сети, оценивают максимальный поток в сети, выявляют узкие места в сети и своевременно их ликвидируют. Одновременно с определением максимального потока в сети оценивают суммарные затраты транспортных средств при их движении из начального пункта в конечный. Значения факторов, определяющих рациональную организацию транспортных потоков в сети, изменяются во времени. Наличие внутренних транспортных потоков на каждом участке сети носит вероятностный характер. Отдельные участки транспортной сети изменяют своё состояние (изнашиваются) с разной интенсивностью. Параметры внешней среды периодически изменяются.

Как следствие, для принятия решений в ходе управления транспортными потоками и определения максимального потока в транспортной региональной сети невозможно использовать известный аппарат, основанный на аналитических моделях, называемых графовыми моделями [1].

Для определения изменений организации транспортного потока во времени, нахождения максимального потока и оценки интегральных затрат транспортных средств в динамике предлагается использовать имитационную модель транспортных потоков региона (ИМ ТПР) [2], модифицированную с учётом изменения состояния дорог и параметров внешней среды.

Обобщённая имитационная модель ТПР реализуется на основе комплекса взаимосвязанных имитационных моделей разного уровня. Модели первого уровня позволяют исследовать процессы износа отдельных участков дорог транспортной сети, которые описываются стационарными поглощающими цепями Маркова. Вершины цепи Маркова определяют состояния участков дорог, которые носят вероятностный характер и влияют на пропускные способности этих участков, а также на стоимости проезда транспортных средств по соответствующим отрезкам в заданные моменты времени. Модель второго уровня, используя информацию первого уровня о текущем состоянии участков, позволяет найти множества значений максимальных потоков сети, определить узкие места в сети, устранение которых позволит достичь оптимального распределения транспортных потоков с учётом текущей ситуации.

1 Имитационное моделирование износа участков транспортной сети

На первом уровне детализации рассматриваются отдельные отрезки транспортной сети региона, которая задаётся графом G , состоящим из узлов и дуг. Вся сеть представляется множеством моделей $M = \{M_{ij}\}$, где M_{ij} – модель ij -го участка сети. Все модели M_{ij} описывают случайный процесс накопления повреждений [3].

Каждый ij -й отрезок транспортной сети характеризуется множеством состояний $S = \{S_n\}$ таким образом, что, во-первых, состояние дороги определяется оценочной величиной S_m и, во-вторых, последовательность состояний S_1, S_2, \dots, S_n образует марковскую цепь. Вероятности перехода ij -го отрезка из состояния в состояние задаются матрицей переходов $Q_{ij}[n \times n]$.

Каждое из состояний характеризует степень изношенности дороги. Состояние дорожного покрытия изменяется со временем (изнашивается) и влияет на пропускную способность и стоимость проезда по нему единицы транспортного средства. Очевидно, что пропускная способность участка может уменьшаться, а затраты транспортных средств, движущихся по участку увеличиваться. Состояния дорожного покрытия определяются рядом параметров (ширина, вид покрытия, частота ремонта и др.). Каждое из состояний модели задаётся сочетанием выделенных параметров и задает износ дороги в процентах. Количество состояний модели определяется исследователем в ходе имитационного эксперимента. Увеличение числа состояний приводит к более детальному рассмотрению участка сети.

Отдельные участки дорог могут иметь разные режимы технического обслуживания, поэтому их можно рассматривать как невосстанавливаемые и как восстанавливаемые объекты. Для восстанавливаемых участков дорог используется идентичная модель с возвратами в предыдущие состояния. Соответственно корректируется матрица переходов $Q_{ij}[n \times n]$.

В результате проведения имитационных экспериментов исследователь получает выборки векторов изменения состояний участков сети во времени $VS_{ijk} = \|v_{s_{ijk}}\|$, где k – номер реализации имитационного эксперимента. По выборкам формируются средние значения соответствующих векторов $\overline{VS}_{ijk} = \|\overline{v}_{s_{ijk}}\|$, которые поступают в блок управления ИМ ТПР второго уровня.

2 Имитационное моделирование вероятностных транспортных потоков региональной сети

На втором уровне моделирования транспортная сеть региона задается: графом G с начальным потоком $X^0 = \|x_{ij}^0\|$; матрицей пропускных способностей $\Sigma = \|c_{ij}\|$ ветвей сети; матрицей расстояний между узлами сети $L = \|l_{ij}\|$; матрицей стоимостей проезда транспортных средств по матрице расстояний вдоль ветви $Q = \|q_{ij}\|$. Транспортный поток начинается в узле i_0 и завершается узлом j_0 . Матрица пропускных способностей и матрица стоимостей формируются для определённых моментов времени в блоке управления на основании усреднённых данных $\overline{VS}_{ijk} = \|\overline{v}_{s_{ijk}}\|$, сформированных в ходе имитационных экспериментов с моделями первого уровня.

Блок управления содержит правила, задающие следующую информацию:

- как изменятся состояния одних участков сети в зависимости от изменений состояний других участков;
- какими будут пропускные способности и стоимости участков дорог в зависимости от их состояния;
- выделяется группа состояний, которые являются критическими $S_k = \{S_{k1}, \dots, S_{kn}\}$, при этом пропускные способности ветвей, которые перешли в критическое состояние считаются нулевыми;
- как изменится структура графа, в зависимости от перехода отдельных участков сети в критическое состояние, а также при восстановлении отдельных участков сети.

На основе правил, составляющих блок управления, происходит управление процессом изменения модели во времени. Блок управления позволяет контролировать ситуацию в сети на уровне отдельных участков дорог. Как только состояние контролируемого отрезка сети приближается к критическому уровню, он исключается из сети и переходит в режим восстановления. Одновременно срабатывают все правила изменяющие нагрузку на альтернативные пути. Таким образом, итеративно на каждом шаге моделирования второго уровня происходит контроль состояния дорог и управление процессом перераспределения транспортных потоков.

Таким образом, с учётом правил, занесённых в блок управления на этапе описания объекта исследования, получаем матрицу пропускных способностей $\Sigma(t) = \|c_{ij}(t)\|$ и матрицу стоимостей $Q(t) = \|q_{ij}(t)\|$, которые изменяют свои значения во времени.

Кроме этого, в сети имеют место внутренние потоки, величины которых являются случайными и определяются с помощью функций распределения $\Phi_{ij}(\mathcal{G})$. Это обстоятельство означает, что пропускные способности по ij -ой ветви сети уже будут случайной величиной, определяемой из выражения:

$$F_{ij}(c) = c_{ij}(t) - \Phi_{ij}(\mathcal{G}) \quad (1)$$

С учётом этого матрица $\Sigma(t)$ примет вид $\Sigma'(t) = \|F_{ij}(c)\|$.

В соответствии с работой [2] затраты транспортного средства на ветви ij графа сети дорог определяются функционалом:

$$z_{ij}^* = \delta_1 \cdot \ell_{ij}^* + \delta_2 \cdot \left(\frac{\ell_{ij}}{x_{ij}} \right)^* + \delta_3 \cdot (\ell_{ij} \cdot q_{ij})^*, \quad (2)$$

где $0 \leq \delta_k \leq 1$, весовые коэффициенты важности соответственно расстояния (δ_1), времени (δ_2), стоимости (δ_3) движения по ветвям сети, задаваемые исследователем, такие, что $\sum_{k=1}^3 \delta_k = 1$. Верхний индекс “звёздочка” означает нормирование соответственно максимальными их величинами. Нормировка составляющих выражения (2) позволяет оценить затраты транспортного средства в виде скалярной величины для каждого ij -го отрезка и вычислить суммарные затраты при перемещении транспортных потоков из начального узла i_0 в конечный узел сети j_0 .

С учётом выражений (1) и (2) задачи исследования формулируется следующим образом. Найти максимальный поток $\varphi_{i_0, j_0 \max}(t)$ в определённый момент времени, имеющий место при распределении потоков вдоль ветвей сети, задаваемых матрицей $X_1^k(t) = \|x_1^k(t)\|$, при котором интегральные затраты всех транспортных средств являются минимальными

$$\min Z_{i_0, j_0}(t) = \sum_{ij} Z_{ij}(t), \quad (3)$$

определить появление узких мест в сети с учётом динамического изменения ситуации в транспортной сети.

При решении этих задач на l -ой итерации, с учётом вышеизложенного метода задания параметров модели, вероятностная задача превращается в классическую и решается с использованием алгоритма Форда-Фалкерсона. В качестве начального потока выбирается матрица $X^0(t) = \|x_{ij}^0(t)\|$, используется матрица пропускных способностей $\Sigma'(t)$ и определяются

на k -ой итерации само распределение потока по сети $X_{iojol}^k(t) = \|x_{ijiojol}^k(t)\|$, его значение максимального потока $\max \varphi_{iojol}(t)$ и минимальные интегральные затраты $\min Z_{iojol}(t)$. Значения $\max \varphi_{iojol}(t)$ и $\min Z_{iojol}(t)$ запоминаются в базе данных модели (БДМ). Модифицируется номер итерации процедуры Монте-Карло, и все расчёты повторяются сначала. По завершении N итераций этих расчётов в БДМ модели сформированы следующие выборки: само распределение потока по сети $X_{iojol}^k(t) = \|x_{ijiojol}^k(t)\|$, его значение максимального потока $\max \varphi_{iojol}(t)$ и минимальные интегральные затраты $\min Z_{iojol}(t)$.

По этим выборкам объема N формируются средние значения, выборочные дисперсии и точности вычисления этих характеристик с помощью процедуры Монте-Карло по известным функциям:

$$\overline{X_{iojo}^k(t)} = \|\overline{x_{iojo}^k(t)}\|; \quad \overline{\varphi_{iojo}(t)}; \quad \overline{\Phi_{iojo}(t)}. \quad (4)$$

Для поиска узких мест в G проведём покомпонентное вычитание матрицы $\overline{X_{iojo}^k(t)} = \|\overline{x_{iojo}^k(t)}\|$ из матрицы пропускных способностей $\Sigma'(t)$:

$$\Delta \overline{X}(t) = \|\Sigma'(t) - \overline{X_{iojo}^k(t)}\|. \quad (5)$$

В тех местах, где элементы этой матрицы будут иметь отрицательное значение, находятся “узкие места” сети. На величину этой разности пропускные способности должны быть увеличены для того, чтобы граф G обеспечивал максимальные потоки транзитных маршрутов в выбранном направлении из узла i_0 в узел j_0 .

После этого происходит переход на $l+1$ -ю итерацию моделирования. При этом из моделей первого уровня выбираются данные о состоянии дорог в очередной момент времени и проводятся аналогичные шаги моделирования на втором уровне.

Таким образом, в процессе моделирования с использованием ИМ ТПР второго уровня накапливаются данные для выявления узких мест в динамике, определения изменения максимальных потоков и оценки транспортных затрат во времени.

Проведение имитационных экспериментов с различными начальными параметрами позволяет выявить различия в оцениваемых откликах для заданного времени суток и времени года.

Abstract. The paper considers the application of a generalized simulation model of transport streams to determine the maximal stream in the network and its bottle-neck, taking into consideration the influence of random inner streams and probable aging of railways.

Литература

1. С. И. Жогаль, И. В. Максимей, Задачи и модели исследования операций, Ч. 1. Аналитические модели исследования операций, Уч. пособие, Гомель, БелГУТ, 1999.
2. П. Л. Гируц, И. В. Максимей, Е. И. Сукач, О. И. Еськова, Имитационное моделирование вероятностных транспортных потоков региона, Первая научно-практическая конференция “Математическое и имитационное моделирование систем. МОДС ’2006”: Киев, 26–30 июня 2006 г.: Сб трудов, 2006, 185–190.
3. Е. И. Сукач, Использование логического моделирования для исследования сложных систем, Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины, №4 (25) (2004), 60–64.