

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ В КРУПНЫХ ГОРОДАХ****STUDY TO ENHANCE THE FUNCTIONING OF TRANSPORT NETWORKS
IN LARGE CITIES**

Ири шаарлардын транспорттук түйүндөрүнүн кызмат аткаруудагы натыйжалуулугун жогорулатуу боюнча изилдөөлөрдүн жыйынтыгы келтирилген.

Ачкыч сөздөр: натыйжалуулук, транспорт, тармактар, жолдор, автомобилдер.

Приведены результаты исследований по повышению эффективности функционирования транспортных сетей крупных городов.

Ключевые слова: эффективность, транспорт, сети, дороги, автомобили.

It was results of researches on increase of efficiency of functioning of transport networks of large cities are resulted.

Keywords: effective, transport, net, road, automobile.

В настоящее время спрос на перевозки растет быстрее, чем пропускная и провозная способность городских транспортных сетей в крупных городах. Естественно, что повышение спроса на перевозки над возможностями транспортной сети приводит к появлению проблемы функционирования транспортной сети крупных городов, характеризующихся экологическими, социальными и экономическими потерями.

Исследование транспортных потоков на улично-дорожной сети крупных городов проводилась ранее многими учеными, в результате которых получены некоторые зависимости и уравнения позволяющие приступить к решению насущных задач по повышению эффективности функционирования сети дорог и улиц крупных городов [1,2,3,4,5,6,7].

В качестве теоретической базы используются основные положения сложных систем, предложенных Н.П. Бусленко и детально развитые В.В. Калашниковым, В.В. Сильяновым и др. для решения транспортных задач. [1-7].

Оценка функционирования транспортной сети производится по ряду характеристик транспортного потока: скоростям, задержкам, уровням загрузки и многим другим. В качестве наиболее эффективного средства исследования транспортных потоков предложена статическая модель. Улично-дорожная сеть представлена в виде агрегативной А-системы. Система включает агрегаты $A_1, \dots, A_i, \dots$

Состояние агрегата A_i определено параметрами транспортного потока (входными сигналами) в сечении α_i , законами взаимодействия автомобилей на перегоне $\alpha_i b_i$ видом II светофорного регулирования (управляющего сигнала) и законом обслуживания потока в сечении b_i . Транспортный поток на перегонах разделяется на несколько скоростных групп, задаются правила взаимодействия автомобилей в потоке. Перекресток представляется как система массового обслуживания. В модели каждого агрегата A_i предусматриваются несколько алгоритмов II_i управления работой светофорной сигнализации (жесткая координация и поиск разрывов в потоке). Каждый агрегат моделируется по принципу Δt , стыковка агрегатов производится по принципу моделирования в особых состояниях.

В результате моделирования рассчитываются следующие характеристики каждого агрегата в сети в целом: распределение скоростей движения автомобилей на перегонах, распределение длин очередей и времени задержки на перекрестках, количество обгонов в потоке и другие характеристики.

В работе статическая модель используется для постановки активного, машинного, имитационного эксперимента, определяющего наряду с натурным экспериментом, достоверность аналитического моделирования транспортного потока. [1, 2, 3, 4]

В связи с возрастающей интенсивностью движения, стали представлять большой практический интерес исследования закономерностей формирования группового и колонного режимов движения на многополосных городских магистралях.

Модели группового движения, разработанные для загородных дорог, не приспособлены для расчета потоков многополосных магистралей города. В связи с этим в работе предложена аналитическая вероятностная модель, описывающая изменение скоростей групп автомобилей в потоке на магистрали. Использование модели правомерно в диапазоне плотностей потоков от 10 авт/км до 25 авт/км на одну полосу. Рассматривается поток, состоящий из быстрых и медленных автомобилей. В модели вводится параметр, характеризующий свободное движение автомобиля – расстояние между автомобилями, достаточное для смены полосы движения. Рассчитывается число свободно движущихся автомобилей и число автомобилей в очереди на каждой полосе магистрали. Результаты аналитического расчета усредняются с учетом вероятностного характера скоростей свободного движения и интервалов между автомобилями в очереди. Разработанная модель позволяет рассчитать средние скорости автомобилей различных типов и потока в целом на всех полосах магистрали в групповом режиме движения. [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]

В работе предложена модель колонного движения автомобилей на магистрали, которая в отличие от известных моделей «следования за лидером», является вероятностной и моделирует реальный процесс движения, а не его физический аналог. Модель используется в диапазоне плотностей потока от 25 авт/км до 70-100 авт/км на полосу. В результате теоретических исследований установлен вид зависимости интервала S между автомобилями в колонне:

$$S = \alpha V + \Phi(\rho) \tau \sqrt{2AV[1 - Z(V)]} + L, \quad (1)$$

где L – расстояние между неподвижными автомобилями, α – интегральный коэффициент прогноза водителем дорожной ситуации, V – средняя и дисперсная скорости движения автомобиля в колонне, τ – время обратной связи в системе «водитель-автомобиль», $Z(V)$ – коэффициент корреляции между мгновенными скоростями ведущего и ведомого автомобилей, как функция скорости колонны; $\Phi(\rho)$ – надежность выбора безопасного расстояния следования, как функция ρ уровня безопасности движения. В полученной формуле величина $\Phi(\rho) \tau \sqrt{2AV[1 - Z(V)]}$, аналогом коэффициента чувствительности модели «следования за лидером», но в отличие от этого коэффициента, имеет явно выраженный смысл.

С использованием разработанных моделей группового и колонного движения составлен статический алгоритм и на ЭВМ рассчитаны основная диаграмма транспортного потока и уровни безопасности движения для магистралей с различной длиной, числом полос движения и составом потока.

Состав потока: 1 – 100% быстрых, 11 – 40% быстрых, 111 – 20% быстрых автомобилей.

Для задач светофорного регулирования дорожного движения одним из самых основных является вопрос о формировании периодической функции интенсивности движения с периодом S , равным циклу работы световой сигнализации. В работе эта задача решена в аналитическом виде. Пусть в сечении и u перегона задана $\lambda \alpha(t)$ –

интенсивность потока автомобилей, как периодическая функция времени t периода C . Требуется определить вид периодической интенсивности $\lambda_b(t)$ в сечении b перегона.

Транспортный поток состоит из автомобилей $W > 1$ типов, каждый из которых появляется на дороге с вероятностью f_ω , $\sum_{i=1}^W f_\omega = 1$. Выводится следующее соотношение:

$$\lambda_b(t) = \sum_{\omega=1}^{\infty} f_\omega \int_{-\infty}^{\infty} \lambda_a(t - \tau) \varphi_a(\tau / L_{ab}) d\tau, \quad (2)$$

где L_{ab} - длина перегона; $\varphi_\omega(\tau / L_{ab})$ - нормальное распределение времени движения автомобиля типа ω по перегону ab . Разложив функцию $\lambda_\varepsilon(t)$ в ряд Фурье, после преобразований получим [2, 3].

$$\lambda_n(t) = \lambda + \sum_{i=1}^{\infty} \left[A_i \cos\left(\frac{2\pi}{C} it\right) + B_i \sin\left(\frac{2\pi}{C} it\right) \right], \quad (3)$$

где A_i и B_i - коэффициенты разложения ряда Фурье, определяемые аналитическими выражениями в зависимости от параметров: среднего и дисперсии времени проезда по перегону ab , средней λ интенсивности потока, числа полос и длина перегона.

При расчете параметров светофорной сигнализации в системах телеавтоматического регулирования транспортных потоков основную роль выполняют модели работы перекрестка. В диссертации обоснована модель для расчета средней величины задержки автомобилей на перекрестке, обобщающая формулу Миллера на случай периодического изменения интенсивности потока, вызванного работой светофорного устройства на предшествующем перекрестке.

Разработанная формула для расчета величины Q среднего времени задержки автомобиля на перекрестке имеет вид:

$$Q = \frac{s}{2} [(z + t_1)^2 - z^2] - \int_0^{z+t_1} \lambda_b(\tau - y) \tau d\tau + \frac{zJ}{2C(s-\lambda)} \left[S \frac{2x-1}{1-x} + 1 \right] \quad (4)$$

где $\lambda_b(t)$ - периодическая функция времени t движения с периодом C ; S - поток насыщения на перекрестке; z и y - длительность горения красного и зеленого сигналов светофора; C - цикл световой сигнализации; $x = \lambda C / sy$ - загрузка перекрестка; J - вариация интенсивности потока (отношение среднеквадратического отклонения интенсивности потока к ее среднему значению).

Величина t_1 находится из решения интегрального уравнения

$$\int_z^C \lambda_b(t) dt + \int_0^{t_1} \lambda_b(t) dt = s t_1 \quad (5)$$

При постоянной величине интенсивности $\lambda(t) = \lambda$ эта формула совпадает с формулой Миллера.

С увеличением нагрузки улично-дорожной сети стали отчетливо проявляться корреляционные зависимости в изменениях характеристик транспортных потоков на смежных участках сети. В связи с этим в работе необходимо решить две сетевые задачи транспортных потоков - распространение заторов в сети и определения наиболее информационных сечений сети.

Рассматривается процесс разрастания заторов по перегонам сети, вызванный увеличением длины очереди автомобилей на перекрестке и нарушением режимов работы светофоров. На любом перегоне сети может возникнуть помеха движению (поломка автомобиля, ДТП, ремонт, дорожного полотна и пр.), которая перекрывает полосу движения. Определяется, какой участок сети будет охвачен затором зафиксированный промежутком времени. В работе предложен алгоритм решения этой задачи и произведена его практическая апробация, которая дала положительные результаты, расчетные характеристики заторов оказались весьма близкими к фактическим. Разработанный алгоритм можно эффективно использовать при оценке состояния дорожного движения в городе, при прогнозировании заторов и их ликвидации.

Задача по распознаванию наиболее информативных сечений улично-дорожной сети важна при разработке систем оперативного управления транспортными и пассажирскими потоками. Технические средства этих систем должны в реальном масштабе времени снимать основные характеристики потоков (например, интенсивность). Для экономии оборудования, повышения надежности его работы и разгрузки вычислительных устройств желательно измерять характеристики потока в наибольшем числе наиболее информационных сечений сети, а не на всех ее перегонах. Идея предлагаемого метода распознавания информативных состояний сети состоит в использовании того факта, что одни и те же параметры транспортных потоков в различных сечениях сети являются зависимыми случайными величинами. В связи с этим можно рассчитывать значения параметров потоков в большей сети, содержащей $N_{\text{перегонов}}$, по значениям параметров в n сечениях, при условии $n \ll N$. Предложен метод статического анализа интенсивностей потоков на всех $N_{\text{перегонов}}$ сети, при помощи которого определяются n перегонов наиболее информативными параметрами. С использованием уравнения множественной регрессии восстанавливаются значения интенсивности движения на оставшихся $N - n$ перегонов по замерам потоков в n сечениях сети. Как показали расчеты по фактическим данным, при $n = 0,1 N$ погрешность расчета картограмм потоков составляет 4-5 %.

В транспортной системе принцип статистического правдоподобия является обобщением гравитационной модели. В работе принцип статистического правдоподобия определяет корреспонденции из следующей постановки:

максимизировать энтропию $-\sum_{ij} x_{ij} \ln \frac{\varphi_{ij}}{x_{ij}} \rightarrow \max$ на множестве ограничений, отражающих основные наблюдаемые физические закономерности формирования корреспонденций.

где x_{ij} - число участников движения, корреспондирующих из пункта i в пункт j города φ_{ij} - функция предпочтения выбора связи (i, j) .

Ограничение этой задачи учитывают всю доступную информацию о транспортной системе. Максимизация функционала означает, что участники движения стремятся в максимальной степени добиться выполнения собственных предпочтений φ_{ij} в рамках сформулированных ограничений.

Использовались данные трудовых передвижений жителей Бишкека. В результате теоретических исследований предложена модель квантования корреспонденций. Все трудовые поездки жителей разбиваются на R групп с шагом квантования, (дискретности) $\Delta t = \max \{ t_{ij} / R \}$. Фиксируется целое число $z = 1, \dots, R$ и рассматриваются только те составляющие матрицы корреспонденций, для которых

$$t_{ij} = [(z - 1)\Delta t, z\Delta t] \quad (5)$$

где t_{ij} – время движений из i в j

Максимизация энтропии $\sum x_{ij} \ln (1 / \varphi_{ij})$ только для тех связей (ij) , которые удовлетворяют данному условию в рамках ограничений по известной длительности поездок жителей, дает возможность получить результаты.

При больших R результаты получаются весьма точными. Это позволило разработать два расчетных варианта метода квантования (с заданными функциями предпочтения и расселения). Как показало сравнение результатов моделирования с данными обследований передвижений населения, первый вариант метода квантования удобно использовать для долгосрочных расчетов, при более краткосрочных прогнозах целесообразно использование второго варианта метода квантования.

Традиционные методы определения корреспонденций жителей к местам краткосрочного отдыха заключались в поиске эмпирических закономерностей привлекательности мест отдыха и количества населения, тяготеющего к этим местам.

Прогнозирование на долгий срок (10-20лет) требует более обоснованных методов расчета корреспонденций. Предложена модель, учитывающая компонентыб центры населения (городские агломерации), рекреационные зоны и дорожную сеть.

Город, как источнику поездок, представлен истоковой вершиной мощности A . Заданы $i = 1, \dots, N$ зон рекреации с емкостями $B_1, \dots, B_i, \dots, B_N$. Каждый житель выбирает зону с функцией предпочтения φ_i . Определение корреспонденций $X_1, \dots, X_i, \dots, X_N$ проводились из решения задачи

$$\sum_{i=1}^N X_i \ln \frac{\varphi_i}{X_i} \rightarrow \max \quad (6)$$

$$X_i \leq B_i$$

Для практического использования модели определялись функция предпочтения φ_i и емкость зон рекреации B_i . С использованием методов математической статистики установлена зависимость емкостей зон рекреации и функции предпочтения от характерных признаков зон и времени их транспортной доступности.

Единственным средством определения корреспонденций грузового и легкового не маршрутизированного транспорта является метод натурных наблюдений. Однако экспериментально получить корреспонденции в крупном городе практически невозможно из-за чрезвычайной распыленности источников и стоков поездок и их разнообразия. Поэтому, разработанный метод расчета корреспонденций использует доступную информацию.

Улично-дорожная сеть города задана в виде графа $G = [N, A]$, вершинами $k, l \in N$ которого являются перекрестки сети, а дугами $(kl) \in A$ отрезки магистралей между ними. Сеть дорог содержала более 150 вершин и 400 дуг. По результатам обследований транспортных потоков, были установлены интенсивность движения λ_{kl} легковых и грузовых автомобилей на всех дугах $(kl) \in A$ сети G .

Требовалось определить такую матрицу $// X_{ij} //$ для легковых и грузовых автомобилей, наложение которой на сеть обеспечивало бы наблюдаемые интенсивности потоков λ_{kl} на всех дугах. Решение задачи по поиску матрицы $// X_{ij} //$ проводится в несколько этапов.

Первый этап: определяется матрица $// X_{ij} //$ в виде $X_{ij} = \alpha_i \beta_j \varphi(t_{ij})$ - гравитационная модель), где α_i и β_j – транспортные потенциалы источника i и стока j , $\varphi(t_{ij})$ – функция предпочтения, t_{ij} -время движения из i в j .

Решается задача

$$\Delta = \sum_{kl \in A} [\lambda_{kl} - \sum_{ij \in M_{kl}} \alpha_i \beta_j \varphi(t_{ij})]^2 \rightarrow \min \quad (7)$$

где M_{kl} - множество районов i, j , маршрут между которыми проходит по дуге (kl) .

В результате решения определяются такие $\alpha_i \beta_j$, которые обеспечивают минимальное рассогласование Δ между наблюдаемой и расчетной величинами интенсивности потоков на дугах. Вид функции предпочтения выбирался из следующих вариантов:

$\varphi(t_{ij}) = \{\exp(-kt_{ij}), t_{ij}^{-k}, \text{const}\}$. Наилучшее приближение обеспечила экспоненциальная функция предпочтения. В результате решения первого этапа подсчитывается матрица $X_{ij} = \alpha_i \beta_j \exp(-k t_{ij})$ «предпочтительных» поездок.

Второй этап. Решается задача.

$$\sum_{ij} X_{ij} \ln \left(\frac{X_{ij}}{X_{ij}} \right) \rightarrow \max \quad (8)$$

$$\sum_{ij \in M_{kl}} X_{ij} = \lambda_{kl}$$

В результате решения задачи определяется матрица корреспонденций $//X_{ij} //$, наложение которой на сеть обеспечивает фактические величины потоков на дугах сети.

Список литературы

1. Сильянов В.В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации дорожного движения [Текст] / В.В.Сильянов. - М.: Транспорт,1977. – 303 с.
2. Брайловский Н.О. Управление движением транспортных средств[Текст] / Н.О.Брайловский, Б.И. Грановский.- М.: Транспорт, 1975. - 105 с.
3. Брайловский Н.О. Проблемы повышения эффективности функционирования транспортных сетей городов [Текст]: Автореф. Дисс. ... докт. техн.наук / Н.О.Брайловский. -М.: МАДИ,1983. – 29 с.
4. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем [Текст] / Н.П.Бусленко. - М.: Наука,1968. - 356 с.
5. Бусленко Н.П.Лекции по теории сложных систем [Текст] / Н.П.Бусленко,В.В. Калашников,И.Н. Коваленко.-М.: Советское радио,1973. - 440 с.
6. Дрю Д.Р. Теория транспортных потоков и управлениями [Текст] / Д.Р.Дрю. - М.: Транспорт,1972. –424 с.
7. Поляков А.А. Организация движения на улицах и дорогах [Текст] / А.А.Поляков. -М.: Транспорт,1965. –376 с.