

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ МАКРОСКОПИЧЕСКОЙ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ДИАГРАММЫ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА

DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-2-22-28

Manuscript received 17 January 2022;  
Accepted 12 February 2022

Цзянг Хайянь,  
ФГБОУ ВО "Донской государственный технический университет", г. Ростов-на-Дону, Россия,  
[jiang.live.in.rus@mail.ru](mailto:jiang.live.in.rus@mail.ru)

**Ключевые слова:** моделирование, состояние транспортного потока, макроскопическая фундаментальная диаграмма, закономерности изменения накопления, стратегия управления дорожным движением

В статье рассматриваются возможности моделирования дорожного движения для прогноза изменения накопления транспортных средств и анализа состояния транспортного потока на основе макроскопической фундаментальной диаграммы на сетевом уровне. Макроскопическая фундаментальная диаграмма транспортного потока является одним из самых эффективных и активных методов для прогнозирования условий функционирования улично-дорожной сети в городах. Для достоверности исследования использованы транспортные данные интеллектуального видеонаблюдения на улично-дорожной сети центральной части г. Цзинань (КНР). На основе полученных диаграмм построена кусочная двухзональная система, которая может представлять все возможные состояния транспортного потока. В рамках кусочной двухзональной системы приведена динамика зависимости транспортной системы между входящими и выходящими потоками. Для конкретного анализа состояния транспортного потока моделирование осуществлялось с использованием математически-моделирующего комплекса MATLAB 2019a. В результате моделирования дорожного движения получены конкретные аналитические уравнения динамики системы и представлены закономерности изменения накопления автомобилей в рассматриваемых зонах. По тенденции расчетных кривых накопления автомобилей внесено предложение для проектирования стратегии управления дорожным движением в разных состояниях транспортного потока: для тех состояний, что находятся в пределе сбора притягательных кривых, возможно применять ослабленное управление – для тех состояний, что стремятся к точке затора в диаграмме, необходимо применить строгое управление транспортными потоками.

#### Информация об авторах:

Цзянг Хайянь, ФГБОУ ВО "Донской государственный технический университет", кафедра "Организация перевозок и дорожного движения", аспирант, г. Ростов-на-Дону, Россия

#### Для цитирования:

Цзянг Хайянь. Моделирование передвижения транспортных средств на основе макроскопической фундаментальной диаграммы транспортного потока // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Том 16. №2. С. 22-28.

#### For citation:

Jiang Haiyan. (2022) Modeling the movement of vehicles based on a macroscopic fundamental diagram of the traffic flow. T-Comm, vol. 16, no.2, pp. 22-28. (in Russian)

## 1. Введение

Основной классической проблемой для моделирования дорожного движения на улично-дорожной сети города, является недостижимость предполагаемых результатов макромоделей вследствие отсутствия нужных данных, случайности выборов маршрутов водителями, неопределенности дорожного движения в условиях насыщенной сети.

В течение ряда лет с учетом развития информационно-коммуникационных технологий, интеллектуальных транспортных систем (ИТС), использования информационных ресурсов больших данных, обеспечивающих моделирование исходными данными, получили ожидаемые результаты в процессы управления дорожным движением и планирования транспортных систем.

В процессе развития макромоделей дорожного движения была предложена функция стабильного состояния, описывающая определенные зависимости между накоплением и параметрами дорожного движения – средней скоростью, транспортным потоком, долей остановившихся автомобилей на улично-дорожной сети города [3, 9, 13]. На основе вышеизложенных исследований в работах С. Даганзо и Н. Геролнимис была предложена макроскопическая фундаментальная диаграмма транспортного потока (Macroscopic Fundamental Diagram – MFD), описывающая зависимости между интегральными характеристиками дорожного движения – производительностью, накоплением, эффективностью и средней плотностью [2, 4-7]. Преимущество макроскопической фундаментальной диаграммы транспортного потока проявляется в том, что не требуются многие входные данные и имеется низкая восприимчивость для динамических матриц корреспонденций на улично-дорожной сети города. Поэтому методы для управления дорожным движением начинали развиваться на основе макроскопической фундаментальной диаграммы.

Теория оптимальной стратегии управления дорожным движением на основе макроскопической фундаментальной диаграммы предложена в работе С. Даганзо для заторовых ситуаций на улично-дорожной сети города. Основным принципом этой теории является применение методов управления дорожным движением на основе нахождения оптимального значения накопления автомобилей для обеспечения максимального значения параметров макроскопической основной диаграммы транспортного потока.

Однако практика управления дорожным движением показывает, что оптимальная стратегия управления дорожным движением не может быть реализована в целом для городской транспортной системы [10, 11, 15]. Ввиду неравномерности загрузки улично-дорожной сети в разных зонах, различных топологических характеристик сети, найденные решения являются обобщенными. На самом деле, с учетом динамической характеристики макроскопической фундаментальной диаграммы возможно применять методы управления дорожным движением на многозональном уровне для связанных зон улично-дорожной сети с различными стратегиями управления для этих зон.

В настоящее время разрабатываются новые алгоритмы для прогноза тенденции накопления автомобилей в городском районе и расширяются функциональные возможности

методов управления дорожным движением на основе данной диаграммы транспортного потока на сетевом уровне.

## 2. Постановка задачи

Оптимизации дорожного движения с учетом особенностей двух или нескольких городских районов является типичной темой при динамическом управлении транспортными потоками. Для исследования этой темы в дальнейшей работе приведена конкретная обстановка центральной части улично-дорожной сети г. Цзинань (КНР) с полученными данными и макроскопическими основными диаграммами. Для формирования стратегии управления дорожным движением на основе макроскопической основной диаграммы использовалась следующая улично-дорожная сеть города, разделенная на две зоны – протяженность дорог первой зоне составляет 16,11 км, во второй – 10,34 км (Рис.1).

Второй район может называться центральной зоной. В данном районе сосредоточены крупные торговые комплексы, правительственные учреждения, культурные достопримечательности. Поэтому по анализу категории источников транспортных данных в районе 2 производится большинство эндогенного потока когда пункт отправления и пункт назначения находится в одном районе. В районе 1 производится большинство экзогенного потока, который проходит из района 1 в район 2, в то же время район 2 является зоной притяжения в процессе дорожного движения.

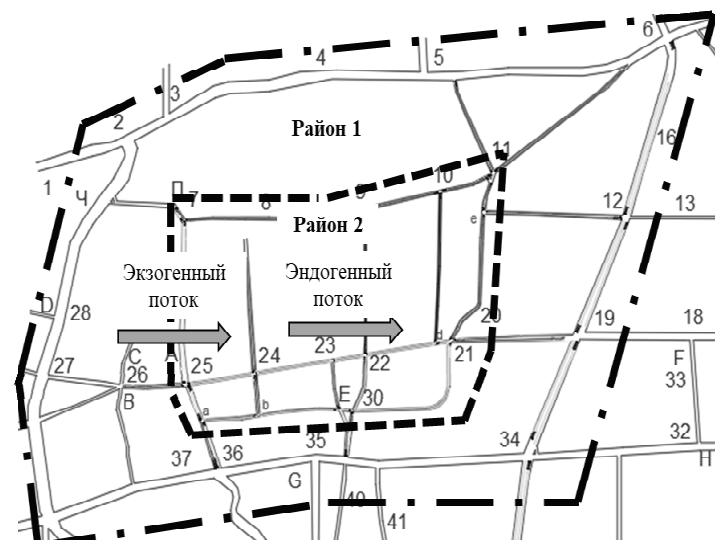


Рис. 1. Фрагмент улично-дорожной сети центральной части г. Цзинань для исследования оптимизации дорожного движения в двухзональной системе с эндогенными и экзогенными потоками

Для отдельного исследования характеристик транспортного потока собственные макроскопические фундаментальные диаграммы обоих районов с использованием данных системы мониторинга дорожного движения сформированы и показаны в следующих видах (Рис.2) [1]. Очевидно, сравнительно с районом 1 по разному разбросу полученной диаграммы транспортного потока район 2 может иметь более частое изменение нагрузки и более сложная структура улично-дорожной сети.

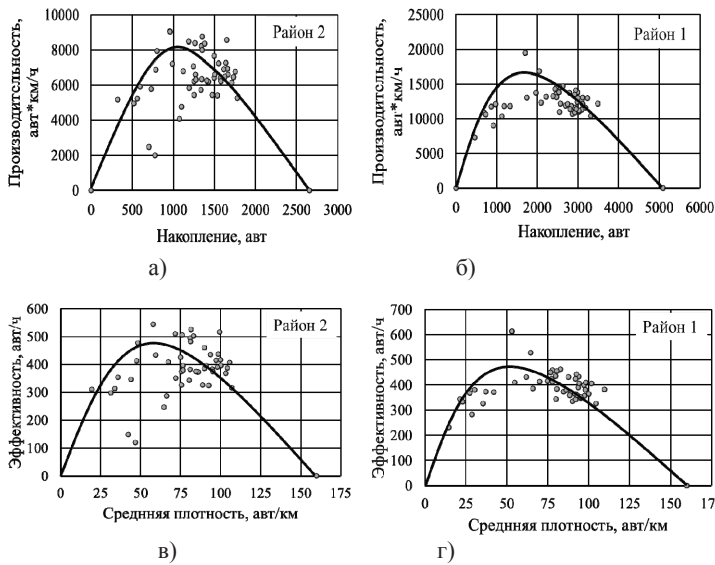


Рис. 2. Макроскопическая фундаментальная диаграмма транспортного потока для районов, выделенных на рис. 1

С целью координации управления дорожным движением в обоих районах построена кусочная двухзональная система на основе макроскопической фундаментальной диаграммы является активным методом в процессе анализа состояния транспортного потока. Основная схема этой кусочной системы на основе собственных макроскопических основных диаграмм транспортного потока показана на рисунке 3.

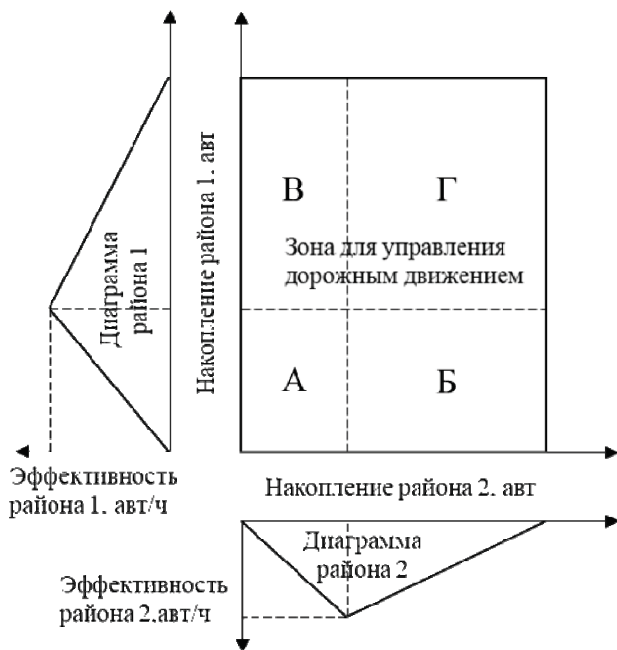


Рис. 3. Кусочная двухзональная система на основе макроскопической основной диаграммы транспортного потока

Центральная зона для управления дорожным движением сформируется собственной макроскопической основной диаграммой обоих районов, имеющей треугольный сжатый вид с характеристическими значениями – максимальное значение параметров производительности или эффективности, накопления.

По координатам максимальное значение параметров обоих районов центральная зона разграничивается на четыре части: часть А, Б, В, и Г. Каждая из этих частей представляется разным состоянием транспортного потока в обоих районах. Часть А соответствует свободным и стабильным условиям до пропускной способности сети в обоих районах. Часть Б соответствует заторовым состоянием на участках сети с пропускной способности сети до затора целой сети в горизонтальной координате (район 2), соответствует свободным и стабильным условиям до пропускной способности сети в вертикальной координате (район 1). Часть В, наоборот, соответствует заторовым состоянием на участках сети с пропускной способности сети до затора целой сети в вертикальной координате (район 1), соответствует свободным и стабильным условиям до пропускной способности сети в горизонтальной координате (район 2). Часть Г соответствует заторовым состоянием на целой сети в обоих районах, в то же время параметр накопления автомобилей достигает высокого уровня, который трудно выдержать на данной улично-дорожной сети.

Задача состоит в получении прогноза закономерности изменения накопления автомобилей и анализа состоянии транспортного потока при рассматриваемой двухзональной системы.

### 3. Обоснование метода

С точки зрения С. Даганза, прежде всего, динамика системы в параметрах макроскопической фундаментальной диаграммы транспортного потока описывается в предположении, что при изменении уровня насыщения автомобилями определенной зоны изменяются и другие характеристики транспортного потока:

$$\frac{dn(t)}{dt} = f(t) - O(n(t)), \tag{1}$$

где  $n$  – количество автомобилей, находящихся в рассматриваемой зоне;  $f$  – входящий поток в зону;  $O$  – выходящий поток в зону;  $t$  – время поездки.

При неперемным условию формулы (1) в определённом времени мониторинга (с времени начала поездки 0 до времени конца поездки  $t$ ) дифференциальные уравнения динамики системы о изменении накопления макроскопической фундаментальной диаграммы транспортного потока описываются на следующих:

$$\frac{dn_1(t)}{dt} = q_1 - G_1(n_1(t)) \cdot u(t), \tag{2}$$

$$\frac{dn_2(t)}{dt} = q_2 + G_1(n_1(t)) \cdot u(t) - G_2(n_2(t)), \tag{3}$$

$$0 < u_{\min} \leq u(t) \leq u_{\max} < 1. \tag{4}$$

где  $n_i$  – количество автомобилей, находящихся в районе  $i$  ( $i=1,2$ ), авт;  
 $q_i$  – входящий/выходящий транспортный потока района  $i$  ( $i=1,2$ ), авт/ч;

$n_i$  – эндогенный / экзогенный транспортный потока района  $i$  ( $i=1,2$ ), авт/ч;

$u$  – пограничный контроль для входящего потока между двумя районам.

Для удобства исследования оптимизация дорожного движения предел управляемой пороговой величины пограничного контроля определен между цифрой 0 и 1, то есть максимальное значение пограничного контроля не превышает цифру 1, минимальное значение пограничного контроля не ниже цифру 0.

В рамках построенной двухзональной системы аналитические решения треугольного сжатого вида макроэкономической фундаментальной диаграммы транспортного потока описывается кусочными уравнениями при разных пределах значения накопления автомобилей.

При пределе значения накопления автомобилей  $0 \leq n_i(t) \leq n_{nc,i}$  используется следующее уравнение для описания аналитического решения макроэкономической фундаментальной диаграммы:

$$G_i(n_i(t)) = \frac{K_{nc,i}}{n_{nc,i}} \cdot n_i(t), \quad (5)$$

При пределе значения накопления автомобилей  $n_{nc,i} \leq n_i(t) \leq n_{затоп,i}$  используется следующее уравнение для описания аналитического решения макроэкономической фундаментальной диаграммы:

$$G_i(n_i(t)) = \frac{-K_{nc,i}}{n_{затоп,i} - n_{nc,i}} \cdot n_i(t) + \frac{K_{nc,i} \cdot n_{затоп,i}}{n_{затоп,i} - n_{nc,i}}. \quad (6)$$

где

$K_{nc}$  – максимальное значение эффективности при пропускной способности в районе  $i$  ( $i=1,2$ ), авт/ч;

$n_{nc}$  – значение накопления автомобилей при пропускной способности в районе  $i$  ( $i=1,2$ ), авт/ч;

$n_{затоп}$  – максимальное значение накопления при заторном состоянии в районе  $i$  ( $i=1,2$ ), авт/ч.

Таким образом, выводные аналитические дифференциальные уравнения, описывающие кривую зависимости между накоплениями автомобилей обоих районов, получены для следующих разных частях кусочной двухзональной системы:

1. Для части А двухзональной системы:

– для района 1:

$$\frac{dn_1(t)}{dt} = q_1 - \left( \frac{K_{nc,1}}{n_{nc,1}} \cdot n_1(t) \right) \cdot u(t), \quad (7)$$

– для района 2:

$$\frac{dn_2(t)}{dt} = q_2 + \left( \frac{K_{nc,1}}{n_{nc,1}} \cdot n_1(t) \right) \cdot u(t) - \left( \frac{K_{nc,2}}{n_{nc,2}} \cdot n_2(t) \right); \quad (8)$$

2. Для части Б двухзональной системы:

– для района 1:

$$\frac{dn_1(t)}{dt} = q_1 - \left( \frac{K_{nc,1}}{n_{nc,1}} \cdot n_1(t) \right) \cdot u(t), \quad (9)$$

– для района 2:

$$\frac{dn_2(t)}{dt} = q_2 + \left( \frac{K_{nc,1}}{n_{nc,1}} \cdot n_1(t) \right) \cdot u(t) - \left( \frac{-K_{nc,2}}{n_{затоп,2} - n_{nc,2}} \cdot n_2(t) + \frac{K_{nc,2} \cdot n_{затоп,2}}{n_{затоп,2} - n_{nc,2}} \right); \quad (10)$$

3. Для части В двухзональной системы:

– для района 1:

$$\frac{dn_1(t)}{dt} = q_1 - \left( \frac{-K_{nc,1}}{n_{затоп,1} - n_{nc,1}} \cdot n_1(t) + \frac{K_{nc,1} \cdot n_{затоп,1}}{n_{затоп,1} - n_{nc,1}} \right) \cdot u(t), \quad (11)$$

– для района 2:

$$\frac{dn_2(t)}{dt} = q_2 + \left( \frac{-K_{nc,1}}{n_{затоп,1} - n_{nc,1}} \cdot n_1(t) + \frac{K_{nc,1} \cdot n_{затоп,1}}{n_{затоп,1} - n_{nc,1}} \right) \cdot u(t) - \left( \frac{K_{nc,2}}{n_{nc,2}} \cdot n_2(t) \right); \quad (12)$$

4. Для части Г двухзональной системы:

– для района 1:

$$\frac{dn_1(t)}{dt} = q_1 - \left( \frac{-K_{nc,1}}{n_{затоп,1} - n_{nc,1}} \cdot n_1(t) + \frac{K_{nc,1} \cdot n_{затоп,1}}{n_{затоп,1} - n_{nc,1}} \right) \cdot u(t), \quad (13)$$

– для района 2:

$$\frac{dn_2(t)}{dt} = q_2 + \left( \frac{-K_{nc,1}}{n_{затоп,1} - n_{nc,1}} \cdot n_1(t) + \frac{K_{nc,1} \cdot n_{затоп,1}}{n_{затоп,1} - n_{nc,1}} \right) \cdot u(t) - \left( \frac{-K_{nc,2}}{n_{затоп,2} - n_{nc,2}} \cdot n_2(t) + \frac{K_{nc,2} \cdot n_{затоп,2}}{n_{затоп,2} - n_{nc,2}} \right); \quad (14)$$

Может отметить, что существует особое состояние между эндогенными и экзогенными транспортными потоками в рассматриваемом районе – позволяет уравнение выполняться  $\frac{dn_i(t)}{dt} = 0, (i = 1, 2)$ .

Это особое состояние, объясняющее достигать некоторый баланс между входящими и выходящими потоками, проводит к точкам равновесия путём аналитического решения дифференциальных уравнений для разных частей двухзональной системы. Координаты точек равновесия описываются следующими уравнениями:

$$(n_{pa,2}, n_{pa,1})_A = \left( \frac{(q_1 + q_2) \cdot n_{nc,2}}{K_{nc,2}}, \frac{q_1 \cdot n_{nc,1}}{K_{nc,1} \cdot u} \right), \quad (15)$$

$$(n_{pa,2}, n_{pa,1})_B = \left( n_{затоп,2} - \frac{(n_{затоп,2} - n_{nc,2}) \cdot (q_1 + q_2)}{K_{nc,2}}, \frac{q_1 \cdot n_{nc,1}}{K_{nc,1} \cdot u} \right), \quad (16)$$

$$(n_{pa,2}, n_{pa,1})_B = \left( \frac{(q_1 + q_2) \cdot n_{nc,2}}{K_{nc,2}}, n_{затоп,1} - \frac{q_1 \cdot (n_{затоп,1} - n_{nc,1})}{K_{nc,1} \cdot u} \right), \quad (17)$$

$$(n_{pa,2}, n_{pa,1})_Г = \left( n_{затоп,2} - \frac{(n_{затоп,2} - n_{nc,2}) \cdot (q_1 + q_2)}{K_{nc,2}}, n_{затоп,1} - \frac{q_1 \cdot (n_{затоп,1} - n_{nc,1})}{K_{nc,1} \cdot u} \right). \quad (18)$$

где  $n_{pa}$  – точка равновесия в районе  $i$  ( $i=1,2$ ).

На основе вышеизложенных аналитических уравнений их координаты получено необходимое и достаточное условие точек равновесия, удовлетворяющих всем требованиям предела значения накопления автомобилей ( $0 \leq n_i(t) \leq n_{nc,i}$  или  $n_{nc,i} \leq n_i(t) \leq n_{затоп,i}$ ,  $i=1,2$ ), при треугольным сжатым виде макроскопической фундаментальной диаграммы:

$$q_1 + q_2 < K_{nc,2}, \quad (19)$$

$$q_1 < K_{nc,1} \cdot u. \quad (20)$$

Для исследования свойства точки равновесия в каждой частях двухзональной системы при особенных значениях  $n_1 = n_{pa,1}$  и  $n_2 = n_{pa,2}$  приведена матрица Якоби на следующего вида:

$$M = \begin{bmatrix} \frac{\partial(q_1 - G_1(n_1(t)) \cdot u(t))}{\partial n_1} & \frac{\partial(q_1 - G_1(n_1(t)) \cdot u(t))}{\partial n_2} \\ \frac{\partial(q_2 + G_1(n_1(t)) \cdot u(t) - G_2(n_2(t)))}{\partial n_1} & \frac{\partial(q_2 + G_1(n_1(t)) \cdot u(t) - G_2(n_2(t)))}{\partial n_2} \end{bmatrix}; \quad (21)$$

По результатам решений приведенных дифференциальных уравнений в частных производных матрицы Якоби в каждой частях двухзональной системы при значениях точки равновесия показаны в следующем виде:

$$M_A = \begin{bmatrix} -\frac{K_{nc,1}}{n_{nc,1}} \cdot u & 0 \\ \frac{K_{nc,1}}{n_{nc,1}} \cdot u & -\frac{K_{nc,2}}{n_{nc,2}} \end{bmatrix}, \quad (22)$$

$$M_B = \begin{bmatrix} -\frac{K_{nc,1}}{n_{nc,1}} \cdot u & 0 \\ \frac{K_{nc,1}}{n_{nc,1}} \cdot u & \frac{K_{nc,2}}{n_{затоп,2} - n_{nc,2}} \end{bmatrix}, \quad (23)$$

$$M_B = \begin{bmatrix} \frac{K_{nc,1}}{n_{затоп,1} - n_{nc,1}} \cdot u & 0 \\ -\frac{K_{nc,1}}{n_{затоп,1} - n_{nc,1}} \cdot u & -\frac{K_{nc,2}}{n_{nc,2}} \end{bmatrix}, \quad (24)$$

$$M_\Gamma = \begin{bmatrix} \frac{K_{nc,1}}{n_{затоп,1} - n_{nc,1}} \cdot u & 0 \\ -\frac{K_{nc,1}}{n_{затоп,1} - n_{nc,1}} \cdot u & \frac{K_{nc,2}}{n_{затоп,2} - n_{nc,2}} \end{bmatrix}. \quad (25)$$

Ориентируясь на работы Х. Халил, С. Састри, Д. Хаддад и Н. Геролнимис о матрицах Якоби при анализах собственных значениях сделаны следующие выводы для каждой частей двухзональной системы [8, 12, 14]:

– Вследствие отрицательных значений диагональных элементов матрицы  $-\frac{K_{nc,1}}{n_{nc,1}} \cdot u$  и  $-\frac{K_{nc,2}}{n_{nc,2}}$ , точка равновесия части А является стабильной точкой.

– Вследствие положительных значений диагональных элементов матрицы  $\frac{K_{nc,1}}{n_{затоп,1} - n_{nc,1}} \cdot u$  и  $\frac{K_{nc,2}}{n_{затоп,2} - n_{nc,2}}$ , точка равновесия части Г является нестабильной точкой.

– Вследствие того, что диагональные элементы матрицы имеют положительные и отрицательные значения, точки равновесия части Б, В являются нестабильными седловыми точками.

#### 4. Результаты моделирования

Для конкретного анализа состояния транспортного потока в полученной двухзональной системе улично-дорожной сети центральной части г. Цзинань моделирование осуществлялось с использованием математически-моделирующего комплекса MATLAB 2019a на основе этих выводных дифференциальных аналитических уравнений. Точки начального состояния накопления автомобилей являются входными координатами соответственных аналитических дифференциальных уравнений по данным мониторинга параметров дорожного движения.

Входные данные параметрах макроскопической фундаментальной диаграммы транспортного потока, обрабатываемого при городской системе мониторинга дорожного движения, принимается на следующих:

–  $q_1$  – экзогенный поток: 0.05 авт/с;  $q_2$  – эндогенный поток: 0.06 авт/с;

–  $K_{nc}$ , – максимальное значение эффективности при пропускной способности в районе  $i$  ( $i=1,2$ ):  $K_{nc,1} = 0.171$  авт/с,  $K_{nc,2} = 0.151$  авт/с;

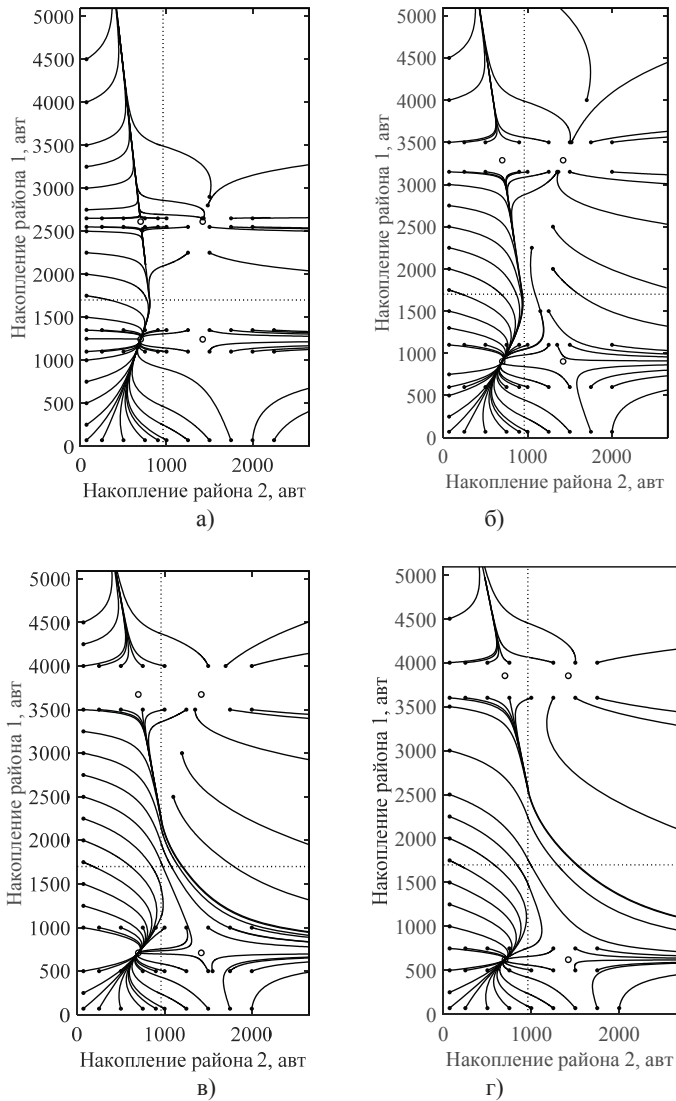
–  $n_{nc}$ , – значение накопления автомобилей при пропускной способности в районе  $i$  ( $i=1,2$ ):  $n_{nc,1} = 1700$  авт,  $n_{nc,2} = 960$  авт;

–  $n_{затоп}$ , – максимальное значение накопления при заторном состоянии в районе  $i$  ( $i=1,2$ ):  $n_{затоп,1} = 5090$  авт,  $n_{затоп,2} = 2657$  авт.

В результате моделирования, прежде всего, получены зависимости между накоплениями автомобилей обоих районов при разных параметрах для управления дорожным движением, приведены на рисунке 4.

В данном результате моделирования для анализа состояния транспортного потока достаточно представлены закономерности изменения накопления автомобилей при ужесточении ограничения входным движением (пограничный контроль  $u=0.4-0.8$ ).

При пограничном контроле  $u=0.4$  существует сбор кривых изменения накопления – сбор притягательных кривых, которые стремятся к точке равновесия  $(n_{pa,1}, n_{pa,2})_A$  в определенном времени; и их вертикальные координаты исходных точек ниже точек равновесия  $(n_{pa,1}, n_{pa,2})_B$  и  $(n_{pa,1}, n_{pa,2})_Г$ . При пограничным контроле  $u=0.55$  соответственные величины точек равновесия  $(n_{pa,1}, n_{pa,2})_B$  и  $(n_{pa,1}, n_{pa,2})_Г$  повышали и предел сбора притягательных кривых расширялся.



**Рис. 4.** Кривые зависимости между накоплениями обоих районов при разных параметрах для управления дорожным движением в определённом времени мониторинга: а)  $u = 0.4$ ; б)  $u = 0.55$ ; в)  $u = 0.7$ ; г)  $u = 0.8$

При пограничном контроле  $u=0.7$  и  $0.8$  соответственные величины точек равновесия  $(n_{pa})_B$  и  $(n_{pa})_Г$  также повышались, однако пределы сбора притягательных кривых показали тенденцию уменьшения. При пограничном контроле  $u=0.8$  появляется минимальный предел сбора притягательных кривых в этой исследовании.

### 5. Заключение

Построенная двухзональная система функционирует в анализе состояния транспортного потока на основе макроскопической фундаментальной диаграммы, которая делится на четыре части.

Приведены динамики транспортной системы в двухзональной системе и получены аналитические решения в условиях разных состояний транспортного потока. Представлено и особое состояние, характеризующееся достижением баланс между входящими и выходящими потоками путём

аналитического решения дифференциальных уравнений для разных частей двухзональной системы.

Выяснены изменения сбора притягательных кривых при разных пограничных контролях. Этими изменениями непосредственно определяется применение стратегия управления дорожным движением при различных состояниях транспортного потока. Для тех состояний, что находятся в пределах сбора притягательных кривых, может применяться ослабленное управление. Для тех состояний, что стремятся к точке затора в диаграмме, необходимо применить строгое управление транспортными потоками.

### Литература

1. Зырянов В.В., Цзянг Х. Применение макроскопической фундаментальной диаграммы транспортного потока с использованием данных системы видеонаблюдения на улично-дорожной сети г. Цзинань КНР // Десятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2021). Труды конференции (электронное издание), 20-22 октября 2021 г., Санкт-Петербург: АО «ЦТСС», 2021. 694 с. ISBN 978-5-905526-05-3. С. 574-580.
2. Зырянов В.В. Исследование свойств сетевой основной диаграммы транспортного потока // Сборник докладов одиннадцатой международной конференции «Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах», Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, 2014. С. 66-72.
3. Ardekani S., Herman R. Urban network-wide variables and their relation // Transportation Science 21, 1987. P. 1-16.
4. Daganzo C.F. Urban gridlock: macroscopic modeling and mitigation approaches // Transportation Research Part B 41 (1), 2007. С. 49-62.
5. Daganzo C.F., Geroliminis N. An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic // Transportation Research Part B 42 (9), 2008. P. 771-781.
6. Geroliminis N., Sun J. Properties of a well-defined macroscopic fundamental diagram for urban traffic // Transportation Research Part B 45 (3), 2011. P. 605-617.
7. Geroliminis N., Daganzo C.F. Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: some experimental findings // Transportation Research Part B 42 (9), 2008. P. 759-770.
8. Haddad J., Geroliminis N. On the stability of traffic perimeter control in two-region urban cities // Transportation Research Part B 46, 2012. P. 1159-1176.
9. Herman R., Prigogine I. A two-fluid approach to town traffic. Science 204, 1979. P. 148-151.
10. Ji Y., Geroliminis N. Spatial and temporal analysis of congestion in urban transportation networks // In: Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, DC, 2011.
11. Kalman R.E. Contributions to the theory of optimal control // Boletín Sociedad Matematica Mexicana 5, 1960. P. 102-119.
12. Khalil H.K. Nonlinear Systems, third ed. Prentice Hall. 2002.
13. Mahmassani H., Williams J.C., Herman R. Performance of urban traffic networks. In: Gartner, N.H., Wilson, N.H.M. (Eds.), 10th International Symposium on Transportation and Traffic Theory. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 1987.
14. Sastry S. Nonlinear Systems: Analysis, Stability, and Control. Springer. 1999.
15. Zyryanov V. Simulation Network-Level Relationships of Traffic Flow // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 698 (2019) 066049 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/698/6/066049.

## MODELING THE MOVEMENT OF VEHICLES BASED ON A MACROSCOPIC FUNDAMENTAL DIAGRAM OF THE TRAFFIC FLOW

Jiang Haiyan, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia, [jiang.live.in.rus@mail.ru](mailto:jiang.live.in.rus@mail.ru)

### Abstract

The article discusses the possibilities of traffic modeling for predicting changes in vehicle accumulation and analyzing the state of traffic flow based on a macroscopic fundamental diagram at the network level. The macroscopic fundamental diagram of the traffic flow is one of the most effective and active methods for predicting the conditions of the functioning of the road network in cities. For the reliability of the study, the transport data of intelligent video surveillance on the street and road network of the central part of the city were used. Jinan (China). Based on the obtained diagrams, a piecewise two-zone system is constructed that can represent all possible states of the traffic flow. The dynamics of the dependence of the transport system between incoming and outgoing flows is shown in the frame of a piecewise two-zone system. For a specific analysis of the state of the traffic flow, modeling was carried out using the MATLAB 2019a mathematical modeling complex. As a result of traffic modeling, specific analytical equations of the system dynamics are obtained and patterns of changes in the accumulation of cars in the considered zones are presented. According to the trend of calculated car accumulation curves, a proposal has been made to design a traffic management strategy in different states of the traffic flow: for those states that are within the limit of collecting attractive curves, it is possible to apply weakened control - for those states that tend to the congestion point in the diagram, it is necessary to apply strict traffic flow control.

**Keywords:** modeling, state of traffic flow, macroscopic fundamental diagram, patterns of accumulation changes, traffic management strategy.

### References

1. V.V. Zyryanov, H. Jiang (2021). Application of a macroscopic fundamental diagram of the traffic flow using video surveillance system data on the road network of Jinan, China. *The tenth All-Russian Scientific and practical conference on simulation modeling and its application in science and industry "Simulation modeling. Theory and Practice" (IMMOD-2021)*. Proceedings of the conference (electronic edition), October 20-22, 2021, St. Petersburg: JSC "TSSC". 694 p. P. 574-580. ISBN 978-5-905526-05-3
2. V.V. Zyryanov (2014). Investigation of the properties of the network main diagram of the traffic flow. *Collection of reports of the eleventh international conference "Organization and safety of road traffic in large cities"*, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg. P. 66-72.
3. S. Ardekani, R. Herman (1987). Urban network-wide variables and their relation. *Transportation Science* 21. P. 1-16.
4. C.F. Daganzo (2007). Urban gridlock: macroscopic modeling and mitigation approaches. *Transportation Research Part B* 41 (1). P. 49-62.
5. C.F. Daganzo, N. Geroliminis (2008). An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic. *Transportation Research Part B* 42 (9). P. 771-781.
6. N. Geroliminis, J. Sun (2011). Properties of a well-defined macroscopic fundamental diagram for urban traffic. *Transportation Research. Part B* 45 (3). P. 605-617.
7. N. Geroliminis, C.F. Daganzo (2008). Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: some experimental findings. *Transportation Research. Part B* 42 (9). P. 759-770.
8. J. Haddad, N. Geroliminis (2012). On the stability of traffic perimeter control in two-region urban cities. *Transportation Research. Part B* 46. P. 1159-1176.
9. R. Herman, I. Prigogine (1979). A two-fluid approach to town traffic. *Science* 204. P. 148-151.
10. Ji Y., Geroliminis N. (2011). Spatial and temporal analysis of congestion in urban transportation networks. *Transportation Research Board Annual Meeting*, Washington, DC.
11. R.E. Kalman (1960). Contributions to the theory of optimal control. *Boletin Sociedad Matematica Mexicana* 5. P. 102-119.
12. H.K. Khalil (2002). *Nonlinear Systems*, third ed. Prentice Hall.
13. H. Mahmassani, J.C. Williams, R. Herman (1987). Performance of urban traffic networks. Gartner, N.H., Wilson, N.H.M. (Eds.), *10th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
14. R. Sastry S. (1999). *Nonlinear Systems: Analysis, Stability, and Control*. Springer.
15. V. Zyryanov (2019). Simulation Network-Level Relationships of Traffic Flow. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 698 (2019) 066049 IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/698/6/066049

### Information about author:

Jiang Haiyan, Don State Technical University, Department of Transportation and Traffic Management, postgraduate student, Rostov-on-Don, Russia