



Результаты проведенного исследования позволили провести расчет требуемой ширины проезжей части, количество необходимых полос движения, обеспечивающих требуемое соотношение между пропускной способностью транспортных узлов и уровнем транспортной нагрузки, а также рассчитать длительность оптимального цикла светофорного регулирования.

Литература

1. Михеева, Т.И. Структурно-параметрический синтез интеллектуальных транспортных систем [Текст] / Т.И. Михеева – Самара: Самар. науч. центр РАН, 2008. – 380 с.
2. Михеева Т.И., Михайлов Д.А, Осьмушин А.А. Корпоративная информационная система прогнозирования интенсивности транспортных потоков с использованием нейронных сетей / Организация и безопасность дорожного движения: материалы VI Всероссийской научно-практической конференции. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2013. – С. 116-121.
3. Михеева Т.И., Михайлов Д.А. Применение данных об интенсивности транспортных потоков при организации дорожного движения/ Перспективы развития и безопасность автотранспортного комплекса: материалы II Международной научно-практической конференции, г. Новокузнецк – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2012. – С. 179-183.
4. Руководство по прогнозированию интенсивности движения на автомобильных дорогах / Распоряжение Министерства транспорта Российской Федерации № ОС-555-р от 19.06.2003 г.

Т.И. Михеева, И.Г. Богданова, С.В. Михеев

МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

(Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет))

Управление транспортными потоками является типичной проблемой, в которой, с одной стороны, выступают присущая ей параллельность, динамика, децентрализация и недетерминизм, а с другой – широта спектра приложений, для которых она является ключевой. Разработка и исследование эффективности различных методов управления транспортными потоками (ТрП) требует знания закономерностей их поведения на улично-дорожной сети города – интенсивности движения, плотности, распределения интервалов между транспортными средствами (ТрС) в потоке в заданном сечении, времени проезда по некоторому перегону УДС, транспортных задержек и др.

Известны два основных аспекта общей проблемы управления транспортными потоками.

1. Задача о программном управлении, заключающаяся в нахождении управляющих воздействий $u(t)$, как функций времени, которые бы к некоторому



моменту времени обеспечили переход объекта в заданное состояние при известном начальном состоянии.

2. Задача о синтезе системы, заключающаяся в нахождении уравнений, связывающих воздействие $u(t)$ с некоторыми характеристиками объекта управления.

Таким образом, одной из основных задач является выбор оператора управления $\bar{\varphi}$

$$u(t) = \bar{\varphi}[Y, Y_0, Y_k, t], \quad (1)$$

где $Y(t) = \|Y_i(t)\|_{M \times 1}$ – вектор, описывающий состояние объекта в момент времени t ; Y_0, Y_k – значения вектора Y , соответственно, в начальный и конечный моменты времени t .

При этом степень соответствия результатов поставленной цели характеризуется значением функционала $W = F\{u(t)\}$, именуемого критерием эффективности. Цель управления Z^* заключается в стремлении к минимизации величины критерия, зависящего от управляющих воздействий.

Одним из главных направлений теоретических и экспериментальных исследований в теории транспортных потоков в течение многих лет является изучение зависимостей между основными характеристиками ТрП. Несмотря на это, до настоящего времени не устранены некоторые противоречия между реальными данными и теоретическими предпосылками в основных моделях транспортного потока:

- рассеивание фактических данных параметров дорожного движения и детерминированные соотношения в макромоделях;
- постоянное значение отношения критической k_c и максимальной k_j плотности ТрП k_c/k_j для каждой из моделей и переменное значение отношения k_c/k_j в реальном ТрП;
- однотипность формы зависимости между параметрами транспортных потоков для каждой из моделей и изменение функциональной формы для реальных соотношений интенсивность–плотность, скорость–плотность;
- возможность разрывов между значениями характеристик ТрП при переходе от стабильного состояния к заторовому и гладкими соотношениями для теоретических макромоделей.

Основу детерминированных моделей ТрП составляет функциональная зависимость между его отдельными характеристиками. В стохастических моделях ТрП рассматривается как вероятностный процесс.

Для *макроскопических* моделей средняя скорость потока в каждый момент времени должна соответствовать равновесному значению при данной плотности автомобилей на дороге. Равновесная ситуация – теоретическое допущение для участков дорог без пересечений.

Микроскопическая модель движения ТрС на УДС отражает требования, предъявляемые к решению задач управления движением в условиях функцио-



нирования городских ИТС: значительные колебания режимов движения ТрС, остановки на регулируемых пересечениях и в заторах, смена полосы движения и изменение траектории движения.

Характеристики транспортного потока

Управление сложным объектом требует создания модели объекта управления – транспортного потока.

В рамках макроскопического подхода транспортный поток $\tilde{S} = \{\tilde{s}_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n$, движущийся по улично-дорожной сети – дугам $\tilde{e}_i \in \tilde{E}$ орграфа G , характеризуется общей средней скоростью v , плотностью потока k и интенсивностью движения I в определенный момент времени в определенной точке УДС.

На основе исследований дорожного движения и практики его организации выработаны многочисленные измерители и критерии. К наиболее часто применяемым для характеристики движения показателям относятся:

- интенсивность движения I , авт./ч; авт./сут.;
- плотность транспортного потока k , авт./м, авт./км;
- скорость движения v , км/ч; м/с;
- продолжительность задержки движения D , с;
- состав транспортного потока.

Транспортный поток \tilde{S} определен типом транспортных средств, составляющих его:

$type^S \in T = \{\text{'велосипед'}, \text{'мотоцикл'}, \text{'гужевая_повозка'}, \text{'легковой автомобиль'}, \text{'грузовик 1'}, \text{'грузовик 2'}, \text{'грузовик 3'}, \text{'автобус'}, \text{'троллейбус'}, \text{'автопоезд'}\}$,

т.е. тип ТС: $type^S \in T = \{1, 2, \dots, N\}$; где каждому типу поставлено в соответствие число: «велосипед» - 1, «мотоцикл» - 2, «гужевая_повозка» - 3, «легковой автомобиль» - 4, «грузовик 1» - 5, «грузовик 2» - 6, «грузовик 3» - 7, «автобус» - 8, «троллейбус» - 9, «автопоезд» - 10.

Для приведения неоднородного по составу потока к «однородному», состоящему только из легковых транспортных средств, для каждого типа ТрС определен коэффициент приведения $k_i^{\tilde{S}}$. Для легкового автомобиля $k_4^{\tilde{S}} = 1$, для мотоцикла – $k_2^{\tilde{S}} = 0.5$ и т.д. Коэффициент $k_i^{\tilde{S}}$ для разных типов грузовых ТС определен их грузоподъемностью и варьируется от 1.7 для типа ТС=«грузовик 1» до 3.5 для типа ТС=«грузовик 3».

Класс «Интенсивность движения транспортного потока» $I = \{\tilde{I}_k\}$, $k = 1, 2, \dots, n$ характеризуется количеством транспортных средств, проходящих через сечение участка УДС за единицу времени t .

Объекты класса «Интенсивность движения ТрП» \tilde{I}_k специфицируются следующими характеристиками:

- уникальный номер результата измерения интенсивности $number^I \in N = \{1, 2, \dots, n\}$;



- дуга \tilde{e}_i графа G УДС Θ , на которой определяется интенсивность \tilde{I}_k ;
- количество в потоке транспортных средств определенного типа $NVehicle \in Q^{1 \times N}$, где $Q^{1 \times N}$ – множество векторов размером N ;
- значение интенсивности в приведенных единицах \tilde{I}_i^R – функция

$$\text{ReductIntens: } \tilde{I}_i^R = \sum_{i=1}^N Q_i k_i^{\tilde{s}}$$
;
- интенсивность движения трамваев \tilde{I}_i^T на заданном участке дороги (на дуге графа УДС);
- интенсивность движения пешеходов \tilde{I}_i^P на заданном участке дороги (на дуге графа УДС);
- дата измерения $Date_On \in Date[YY : MM : DD]$; Формат представления – ГГ.ММ.ДД;
- время начала $TimeBegin \in Time [HH : MM]$ и окончания $TimeEnd \in Time [HH : MM]$ измерения интенсивности. Диапазон значений – от 00 час. 00 мин. до 23 час. 59 мин.

Совокупность этих факторов определяет имманентные свойства \tilde{P}^I класса «Интенсивность движения ТрП»:

\tilde{P}^I (Интенсивность движения ТрП) = $(\tilde{e}_i, NVehicle, \tilde{I}_i^R, \tilde{I}_i^T, \tilde{I}_i^P, TimeBegin, TimeEnd, Date_On)$.

Движение транспортных средств на перекрестке канализируется и подразделяется на право-, левоповоротные и прямые потоки, регламентированные направлениями соответствующих дуг графа УДС и установленными дорожными знаками. Интенсивность соответствующих потоков является весовыми характеристиками дуг.

Важнейшее значение в проблеме организации движения имеет временная неравномерность движения в течение года, месяца, суток и часа. Для полноценного анализа и управления транспортными потоками необходима «многослойная» информация об интенсивности ТрП.

Снимок $\tilde{I}_j^S, j = 1, 2, \dots, h$ интенсивности транспортных потоков \tilde{s}_i – множество результатов измерения интенсивности в заданный момент времени в заданных точках УДС. Снимок описывает состояние ТрП в определенные временные периоды – утренний или вечерний часы «пик», в определенных пространственных зонах – участок УДС, магистраль, регион.

Макроскопические модели движения транспортного потока

В процессе развития макроскопических моделей транспортного потока, полученных в рамках классического подхода с использованием детерминированных зависимостей между интенсивностью, плотностью и скоростью транспортного потока, к моделям предъявлялись все новые требования в соответствии с уровнем задач организации движения и перевозок:

$$v = f(k, k_j, v_0, v_w, \zeta_1, \dots, \zeta_n),$$



где k и k_J – плотность потока и максимальная (заторовая) плотность потока, соответственно; v_0 – скорость свободного движения, т. е. максимально возможная скорость на участке дороги; v_w – скорость кинематической волны при заторовой плотности; ζ_1, \dots, ζ_n – совокупность безразмерных параметров. В качестве дополнительного параметра может выступать эквивалентная дистанция:

$$\lambda = \frac{v_w}{v_0} \left(\frac{k_J}{k} - 1 \right). \quad (3)$$

При одной и той же плотности эквивалентная дистанция уменьшается с увеличением скорости, что в полной мере согласуется с требованиями обеспечения безопасности движения, поскольку фактическая дистанция остается неизменной, а эквивалентная дистанция уменьшается, свидетельствуя об усложнении ситуации.

Известны зависимости следующих типов: линейная, логарифмическая, экспоненциальная, степенная, регрессионная, разрывная, вероятностная на основе распределения скорости.

Линейная зависимость между плотностью транспортного потока k и его скоростью v . Линейная зависимость впервые была предложена Гриншилдсом, выражается уравнением (4), впоследствии доработана Ричардсом (5):

$$v = v_0 \left(1 - \frac{k}{k_J} \right) \text{ и } I = v_0 k \left(1 - \frac{k}{k_J} \right), \quad (4)$$

$$v = \frac{4I_C}{k_J} \left(1 - \frac{k}{k_J} \right) \text{ и } I = \frac{4I_C}{k_J^2} k(k_J - k). \quad (5)$$

При высоких значениях скорости свободного движения v_0 применение модели Гриншилдса для определения пропускной способности приводит к завышенным результатам. Для однородного потока из легковых автомобилей при максимальной плотности ТП $k_J = 140 \div 160$ авт/км и скорости при уровне пропускной способности $v_C = 45$ км/час пропускная способность достигает $1800 \div 2000$ авт/час. Расчетные значения пропускной способности для этих условий по модели Гриншилдса составляют $3150 \div 3600$ авт/час. Степень соответствия расчетных и экспериментальных данных в модели Ричардса, так же, как и в модели Гриншилдса, повышается при снижении скорости свободного движения.

Логарифмический тип зависимости имеют макромоделли Гринберга (6) и Эл–Хозаини (7). Модель Гринберга описывается уравнениями:

$$v = v_0 \ln \left(\frac{k_J}{k} \right) \text{ и } I = kv_0 \ln \left(\frac{k_J}{k} \right), \quad (6)$$

и при достижении пропускной способности $k_C = \frac{1}{e} k_J$. Значение нормированной плотности k_C / k_J всегда равно 0.368 при максимальной интенсивности движе-



ния. Недостатком модели является то, что при плотности, стремящейся к нулю, расчетные значения скорости превышают скорость свободного движения:

$$v = v_0 \sqrt{2 \ln \frac{k_J}{k}} \text{ и } I = v_0 k \sqrt{2 \ln \frac{k_J}{k}}. \quad (7)$$

Максимальная интенсивность движения достигается при нормированной плотности $k_c / k_J = 0.60371$ и определяется как $I_c = e^{-0.5} v_0 k_J$. Модель Эл-Хозаини дает достоверные результаты при высокой плотности и скорости транспортного потока менее 17 км/час.

В макромоделях, основанных на *экспоненциальной зависимости* между скоростью и плотностью и представленных моделями Андервуда (8), Дрейка (9), Зырянова (10), при высокой плотности движения ($k > 0.75k_J$) расчетные значения интенсивности превышают фактические:

$$I = v_0 k \exp\left(-\frac{k}{k_J}\right), \quad (8)$$

$$I = v_0 k \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{k}{k_J}\right)^2\right), \quad (9)$$

$$I = v_0 k \left(1 - \exp\left(-\frac{k - k_J}{k}\right)\right). \quad (10)$$

Модель (7) дает достоверный результат только на участке насыщения.

Наиболее известные *степенные модели* Пайпса (11) и Д. Дрю (12) позволяют за счет коэффициента пропорциональности n трансформировать форму зависимости между плотностью и скоростью, приспособившись к конкретным экспериментальным данным.

$$I = v_0 k \left(1 - \frac{k}{k_J}\right)^n, \quad (11)$$

$$I = v_0 k \left(1 - \left(\frac{k}{k_J}\right)^{\frac{n+1}{2}}\right). \quad (12)$$

При $n=1$ уравнение (4) является частным случаем (12).

Усложнение макромоделей ТрП за счет введения дополнительных параметров (13), позволяет исследовать поведение транспортного потока в критических точках – насыщения ТрП и затора.

В качестве дополнительного параметра возьмем время прохождения участка УДС, равного длине автомобиля, движущегося со скоростью свободного движения:

$t_v = \frac{\eta}{v_0 k}$, тогда основные характеристики ТрП при уровне пропускной способности будут определены следующим образом:



$$v_c = \frac{\sqrt{2}v_0(\sqrt{\eta^2 + 1} - \sqrt{2})}{\eta^2 - 1}, \quad k_c = \frac{\sqrt{2}k_J(\sqrt{\eta^2 + 1} - \sqrt{2})}{\eta^2 - 1},$$
$$I_c = 2v_0k_J \left(\frac{\sqrt{\eta^2 + 1} - \sqrt{2}}{\eta^2 - 1} \right)^2. \quad (13)$$

Основная диаграмма транспортного потока, построенная по модели (13) для экспериментальных данных, полученных автором, представлена на рис. 1.

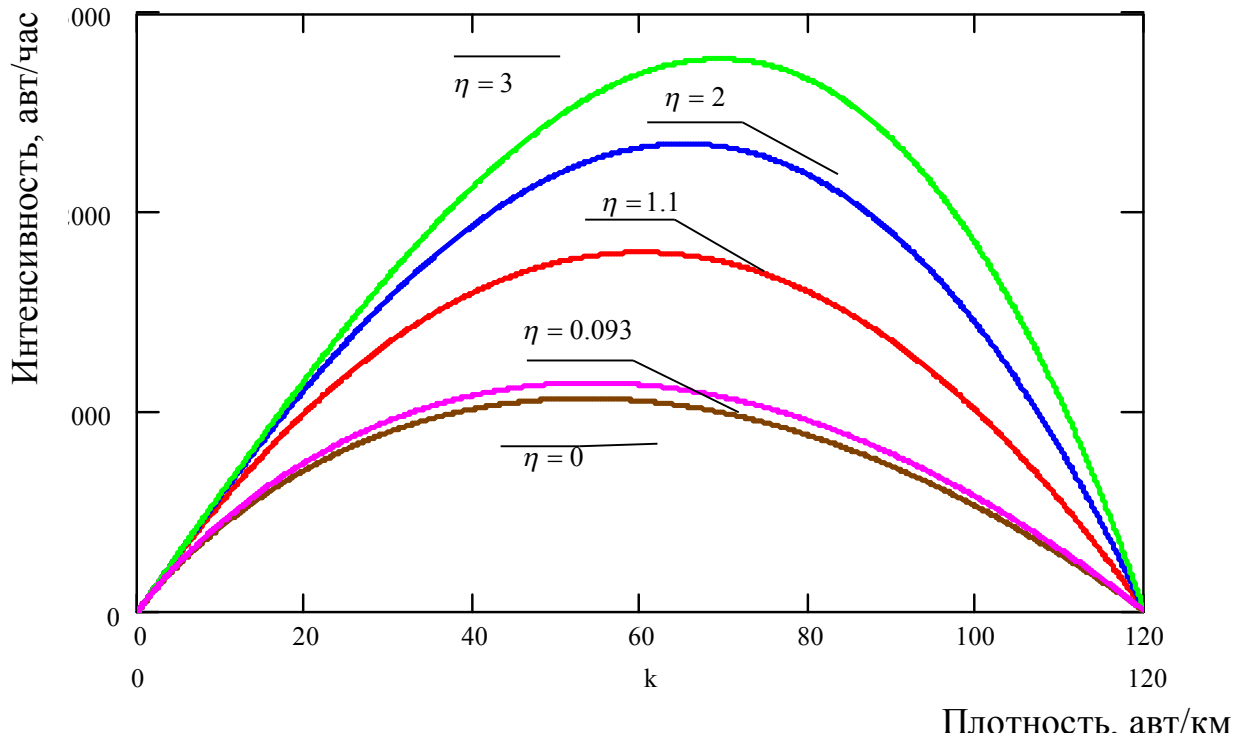


Рис. 1. Основная диаграмма транспортного потока

Литература

1. Михеева Т.И. Структурно-параметрический синтез интеллектуальных транспортных систем [Текст]/ Т.И. Михеева – Самара: Самарю науч. Центр РАН, 2008. – 380 с.
2. Клишковштейн Г.И. Организация дорожного движения. – М.: Транспорт, 1982.– 240 с.