

Снижение вероятности образования транспортных заторов на дорогах высших категорий управлением доступом к сети

Канд. техн. наук, доц. Р. Ю. Лагереv¹⁾, канд. техн. наук Д. В. Капский²⁾

¹⁾ Иркутский государственный технический университет (Иркутск, Российская Федерация),

²⁾ Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Места слияния транспортных потоков на дорогах высших категорий являются наиболее «узкими» участками сети, качество функционирования которых определяет вероятность образования транспортных заторов. Исследования по изучению заторовых ситуаций в зоне слияния рамповых и магистральных потоков показали, что плотный рамповый поток ведет к образованию «турбулентности» по причине перестроения транспортных средств и снижения их скорости на главном направлении. При высокой плотности движения на магистральном направлении «турбулентность» приводит к образованию динамического удара в основном потоке. Доказано, что в сравнении с магистральным потоком воздействие рампового потока на вероятность образования затора намного сильнее. Установлено, что в зоне слияния потоков часть транспортных средств, движущихся по магистрали, занимает одновременно две полосы движения, снижая пропускную способность используемого участка магистрали. Эту особенность важно учитывать и принимать во внимание на участках образования «турбулентности». Представлены основные подходы, методология, принципы и этапы управления доступом к дорогам высших категорий, направленные на повышение качества их функционирования, включая вопросы повышения безопасности дорожного движения. Предложена методика, позволяющая оценить и оптимизировать управление рампами с точки зрения минимизации суммарных длин очередей транспортных средств на примыкающих въездах в контексте снижения вероятности транспортных заторов.

Ключевые слова: O–D-матрицы, рекуррентные транспортные заторы, интеллектуальные транспортные системы, управление доступом к сети, пропускная способность магистралей, магистральные рампы, транспортный спрос

Для цитирования: Лагереv, Р. Ю. Снижение вероятности образования транспортных заторов на дорогах высших категорий управлением доступом к сети / Р. Ю. Лагереv, Д. В. Капский // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 1. С. 52–60

Reduction in Probability of Traffic Congestion on High-Class Road Using Ramp Access Control

R. Yu. Lagerev¹⁾, D. V. Kapsky²⁾

¹⁾Irkutsk State Technical University (Irkutsk, Russian Federation),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Merging traffic junctions on high-class roads are considered as bottlenecks in the network and quality of their operation determines a probability for formation of traffic congestions. Investigations on congestion situations in the merging zones of ramp and freeway traffic flows have demonstrated that queuing ramp traffic flow leads to formation of so called “turbulence” effect due to re-arrangement of transport facilities and reduction in their speed on main road direction. Having high queuing traffic flow on main road the “turbulence” component can result in formation of an impact blow in the main traffic flow. It has been proved that an impact of the ramp traffic flow on congestion probability is higher in comparison with main road traffic flow. The paper makes it possible to establish that some transport facilities moving along a high-way simultaneously occupy two lanes in the merging traffic zones and they reduce capacity of the used road section. It is necessary to take into account this specific feature and it is necessary to pay attention to it in the zones of “turbulence” effect formation. The paper presents main approaches, methodology, principles and stages required for access control of high-class roads which

Адрес для переписки

Капский Денис Васильевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-48-06
d.kapsky@gmail.com

Address for correspondence

Kapsky Denis V.
Belarusian National Technical University
12 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-48-06
d.kapsky@gmail.com

are directed on higher quality of their operation including improvement of road traffic safety. The paper proposes a methodology that allows to evaluate and optimize ramp control in the context of a transport queue length minimization at adjoining ramps for the purposes of probability reduction in transport congestion.

Keywords: O–D-trip matrices, recurrent traffic congestions, intelligent transportation systems, network access management, highway capacity, main road ramps, traffic demand

For citation: Lagerev R. Yu., Kapsky D. V. (2016) Reduction in Probability of Traffic Congestion on High-Class Road Using Ramp Access Control. *Science & Technique*. 15 (1), 52–60 (in Russian)

8 октября 2014 г. в Новосибирске в ходе состоявшейся рабочей встречи участники обсудили необходимость возобновления работ в рамках реализации соответствующих федеральных целевых программ на региональных и муниципальных уровнях. Переговоры прошли в конструктивной и доброжелательной атмосфере. Есть уверенность, что достигнутые договоренности придадут дополнительный импульс дальнейшему развитию транспортной инфраструктуры многих регионов РФ. Одна из важнейших задач, обозначенных рабочей группой на ближайшую и долгосрочную перспективу, – развитие скоростных автомагистралей (далее – магистраль). В действующей нормативной документации по проектированию скоростных дорог высших категорий закладывается основной принцип их функционирования: обеспечение обособленного и безопасного движения транспортного потока – все это можно обеспечить, лишь выполняя требования современных руководств по управлению доступом к скоростным дорогам. Именно поэтому просматривается наличие тенденций развития методов управления магистральными улицами и дорогами с применением адаптивного регулирования с автоматическим мониторингом характеристик транспортных потоков. Существующие

в России подходы к применению адаптивного регулирования реализуемы главным образом для свободного движения (free flow speed).

Как отмечается в специальной технической литературе [1–3], эффективность «классического» адаптивного регулирования резко снижается в случае функционирования связанных регулируемых пересечений в условиях насыщения (saturated) и перенасыщения (oversaturated). Дороги высших категорий должны пропускать большие объемы городских транспортных передвижений. Принцип «концепции концентрации», являющийся неотъемлемой частью современного развития и роста многих городов, будет заложен в долгосрочные программы развития транспортных систем многих российских городов [1, 2].

Основным документом, определяющим концептуальные подходы к управлению транспортными потоками, принято считать американское руководство HCM 2010, в котором подробно изложена процедура оценки эффективности скоростных дорог, охарактеризованы условия образования транспортных заторов, сводящиеся к оценке значений плотности движения на сегментах (рис. 1) магистральной сети (табл. 1) [4].

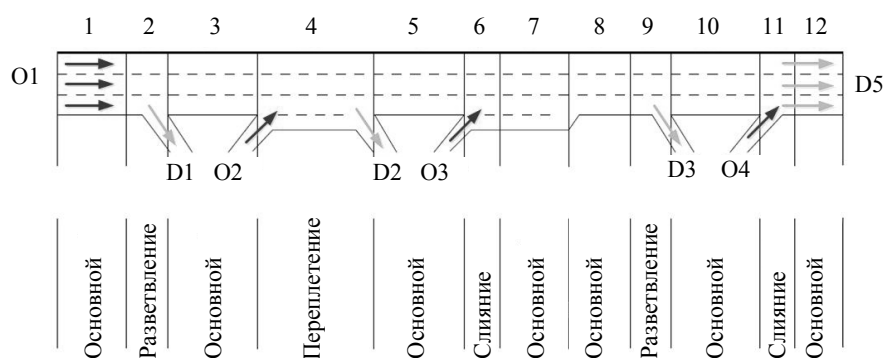


Рис. 1. Дифференциация магистрали на сегменты (HCM 2010)

Fig. 1. Differentiation of main road on segments (HCM 2010)

Рекомендованные граничные значения плотности движения потока на скоростных магистралях (НСМ 2010)

Recommended boundary values on queuing traffic flow at high-speed road (HCM 2010)

Сегмент магистрали	Показатель эффективности	Граничные значения показателя
В зоне основных участков	Плотность (авт./км/полосу)	При плотности движения >29 необходимо снижать доступность на верхних рампах
В зоне переплетения транспортных потоков		При плотности движения >21 необходимо снижать доступность на верхних рампах
В зоне слияния или разветвления потоков		

Именно НСМ 2010 открыто и предметно закладывает основу для дальнейших практических шагов по сохранению бесперебойного и безопасного движения скоростных магистральных потоков [5]. С тем чтобы создать необходимые инструментарии управления ими, возникла первостепенная задача – оценка вероятности образования рекуррентных транспортных заторов на улицах и дорогах высших категорий с учетом имеющейся информации о транспортном спросе. Задачу прогнозирования транспортных заторов можно выполнить с применением программных продуктов микромоделирования транспортных потоков или с помощью теории вероятности отказов работы в системе, что и было предпринято авторами данной статьи [6].

Результаты изучения «турбулентности» и начала образования транспортного затора на участке примыкания питающей рампы к магистральной дороге приведены на рис. 2. Магистральная улица в рассматриваемом случае представлена двумя полосами движения 1 и 2 с примыкающей рампой 0. По условиям моделирования изучалась ситуация, при которой въезд на магистральную дорогу не ограничен и организован по принципу поиска приемлемых разрывов в основных потоках 1 и 2.



Рис. 2. Изучение образования затора в зоне слияния потоков: $0 + 1 + 2 < 4600$ авт./ч; $L = 180$ м

Fig. 2. Study of traffic congestion formation in the zone of merging traffic junctions: $0 + 1 + 2 < 4600$ VPH; $L = 180$ m

Анализ выполненных видеоматериалов на участках примыкания позволил установить

пределы и условия распространения «турбулентности» в зоне взаимодействия потоков (рис. 3). Объем транспортного потока на рампе определяет поведение участников движения на крайней правой полосе 1. При увеличении значения величины потока на рампе, составляющей 15–25 % интенсивности движения магистрального потока, отмечается распространение «турбулентности» на расстояния от 50 до 300 м от зоны взаимодействия потоков. При интенсивности движения рампового потока, превышающей 26 % величины магистрального потока, «турбулентность» частично захватывает крайнюю левую полосу движения 2, способствуя значительному снижению пропускной способности полосы движения и в целом всего транспортного коридора.

Результаты моделирования участка примыкания представлены в виде графика, основная ось которого характеризует транспортный спрос на магистрали, вертикальная ось – вероятность отказа работы в системе, определяемую как начало роста очередей транспортных средств на магистрали перед зоной слияния потоков (рис. 3).

Полученные зависимости рассматриваются как вероятность образования затора от величины транспортного потока на рампе 0. Для примера, при транспортном спросе 5000 авт./ч на магистраль и 23 авт./мин (1380 авт./ч) на примыкающую рампу вероятность образования затора в течение первой минуты оценивается величиной 29 %. Следовательно, в случае постановки задачи снижения вероятности отказа системы необходимо уменьшить поток на примыкающей рампе, например до величины отказа 20 %. Реализовать выполнение рассматриваемых выше условий на практике возможно с применением систем управления доступом к магистралям [4, 7, 8].

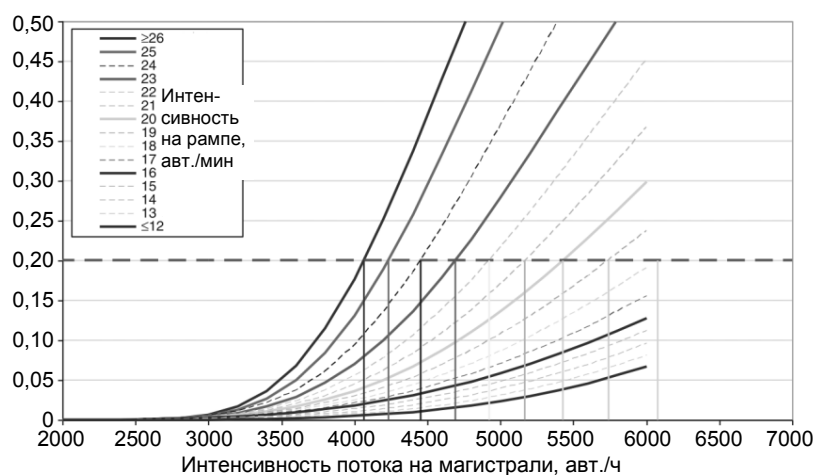


Рис. 3. Результаты оценки вероятности транспортных заторов

Fig. 3. Evaluation results on possibility of road traffic congestions

Представленные на рис. 3 зависимости позволяют при заданном уровне отказа системы многосторонне оценивать требуемое значение пропускной способности магистрали. Например, для верхней границы величины вероятности отказа 20 % пропускная способность магистрали должна равняться суммам значений интенсивности движения основного и примыкающего потоков, соответствующим значениям пунктирной горизонтальной линии (рис. 3).

Для интенсивности движения по рампе 25 авт./мин, что соответствует интенсивности 4200 авт./ч, уровень пропускной способности магистрали должен быть не менее 5700 авт./ч. Установленные эмпирические зависимости могут быть положены в основу для прогнозирования рекуррентных транспортных заторов, образующихся в местах слияния потоков, распространяющихся вверх по ходу движения.

Возможный вариант прогнозирования образования очереди с применением оценки продолжительности устойчивости системы в общем виде изложен ниже.

Функция распределения продолжительности жизненного цикла процесса

$$F(t) = 1 - S(t), \quad (1)$$

где $F(t) = p(T \leq t)$ – функция распределения «устойчивого» состояния системы; T – продолжительность устойчивости; $S(t) = p(T > t)$ – функция надежности системы.

Оценочная функция предела устойчивости системы определяется как

$$\hat{S}(t) = \prod_{t_j < t} \frac{n_j - \delta_j}{n_j}, \quad (2)$$

где n_j – количество позиций с условием $T \geq t_j$; δ_j – то же отказов в системе за время t_j .

Применительно к рассматриваемой задаче прогнозирования затора на магистрали вероятность отказа в период t определяется вероятностью образования транспортного затора при определенной величине критического потока q и его продолжительности (периода активности). Предлагается уравнение (1) принять как функцию распределения вероятности устойчивости магистрали к затору в следующем изложении:

$$F(q) = p(q_i \leq q) = 1 - p(q_i > q), \quad (3)$$

где $F(q)$ – распределение вероятности образования затора; q – фактическая интенсивность движения транспортного потока на полосу; q_i – величина транспортного потока в интервале i , способствующая снижению скорости, рассматриваемая как критическая; $p(q_i > q)$ – вероятность превышения критического потока над фактическим (вероятность отсутствия роста очередей транспортных средств).

Следовательно, уравнение (2) можно представить в виде задачи максимума правдоподобия:

$$\hat{p}(q_i > q) = \hat{S}(q) = \prod_{i: q_i \leq q} \frac{k_i - d_i}{k_i}, \quad i \in B, \quad (4)$$

где q – существующая (наблюдаемая) интенсивность движения транспортного потока на полосу; q_i – величина транспортного потока

в интервале i , способствующая снижению скорости и образованию роста очередей транспортных средств, рассматриваемая как критическая; k_i – количество интервалов (замеров) с условием $q \geq q_i$; d_i – то же нарушений в системе обслуживания потоков q_i ; B – наборы интервалов с отказами $\{B_1, B_2, B_3, \dots\}$.

Соответственно функция вероятности отказа в обслуживании потоков на магистрали примет следующий вид:

$$F(q) = 1 - \prod_{i: q_i \leq q} \frac{k_i - d_i}{k_i}, \quad i \in B. \quad (5)$$

При условии принятия дискретного влияния измеряемых величин потоков на работу системы (одно нарушение d_i на фактический интервальный поток q_i) уравнение (5) можно записать в следующем виде:

$$F(q) = 1 - \prod_{i: q_i \leq q} \frac{k_i - 1}{k_i}, \quad i \in B. \quad (6)$$

Апробация модели (6) – оценки вероятности динамического удара в потоке (в зарубежной литературе *breakdown flow*) – выполнена на примере участка улично-дорожной сети в районе левобережной транспортной развязки Академического моста в г. Иркутске, результаты которой представлены на рис. 4, 5.

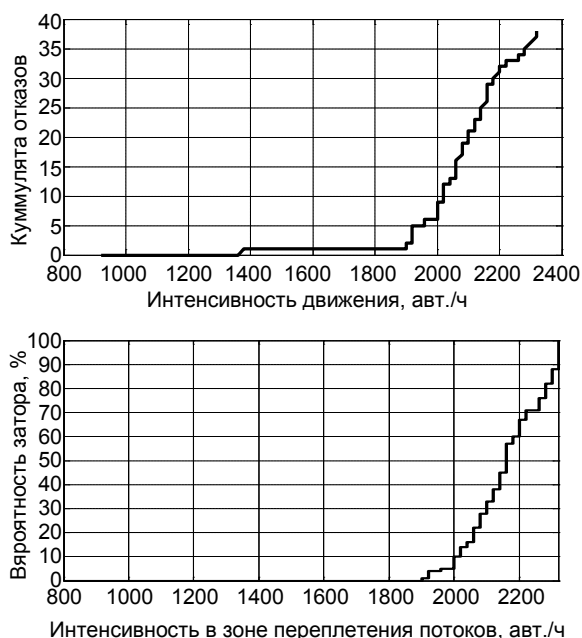


Рис. 4. Анализ отказов на подходе к Академическому мосту в г. Иркутске

Fig. 4. Failure analysis on the way to the Academician Bridge in Irkutsk

Наибольшее количество отказов в системе (15 %) зафиксировано в условиях насыщения зоны слияния (рис. 4). Начиная со значения интенсивности 33 авт./мин, отказы в системе фиксировались с частотой 3/5 (3 отказа на каждые 5 наблюдаемых интервалов). На основании вышеизложенных статистических обследований, принимая за основу зависимости (2)–(6), авторами составлен текст *m*-файла для пакета MatLab, реализующий предлагаемое решение применительно к задаче оценки вероятности распространения очереди с учетом значений интенсивности движения и функции случайных отказов в системе работы узла (рис. 5).

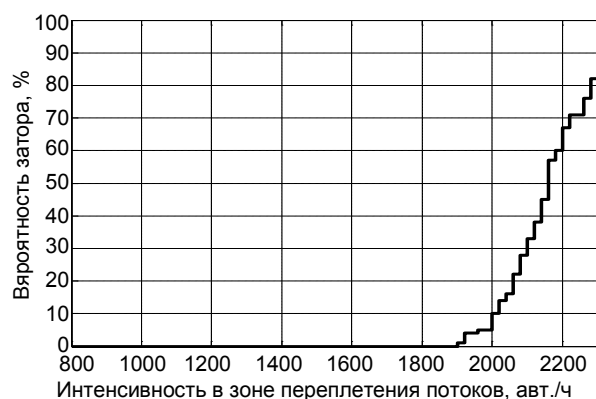


Рис. 5. Результаты моделирования вероятности транспортных заторов

Fig. 5. Simulation results on possibility of transport congestions

Сопоставительный анализ полученных результатов с данными микромоделирования рассматриваемого участка сети позволил утверждать, что модель продолжительности жизненного цикла процесса может быть принята в качестве первого приближения для оценки прогнозирования транспортных заторов и управления скоростными дорогами. Обособленное скоростное движение на магистральных улицах в условиях плотного движения можно обеспечить за счет ограничения въезда на магистраль, другими словами, за счет управления транспортным спросом. В зарубежной практике управления доступом к сети уже на протяжении многих лет уделяется внимание адаптивным методам управления транспортным спросом на скоростных магистралях, основная задача которых – снижение воздействия призывающего/входящего на магистраль потока

с целью предупреждения образования сетевых транспортных заторов (рис. 6) [9–12].

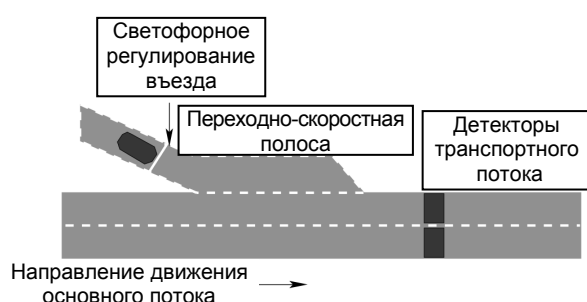


Рис. 6. Схема адаптивного управления доступом к скоростной дороге

Fig. 6. Scheme for adaptive control over access to high-speed road

Отмечается [3], что адаптивные методы управления доступом к магистрали позволяют повысить безопасность слияния транспортных потоков, пропускную способность, снизить расход топлива и выбросы токсичных веществ. В зарубежной практике используют одно- и двухполосные рампы, характеристики обслуживания которых зависят от стратегии управления (одно транспортное средство (ТС) за разрешающий такт или несколько) (табл. 2, рис. 7).

Таблица 2

Стратегии управления регулируемым доступом на магистраль

Control strategy on regulated access to main road

Стратегия	Количество полос на рампе	Длительность цикла регулирования, с	Пропускная способность, авт./ч	
			рампы	зоны слияния
Одно ТС за цикл	1	4,0–4,5	240–900	900
Несколько ТС за цикл	1	6,0–6,5	240–1200	1100–1200

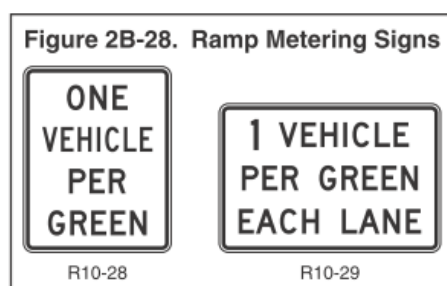


Рис. 7. Знак «Дозирование потока на магистраль» MUTCD

Fig. 7. Sign “Dosage of traffic flow to main road” MUTCD

Ограничение въезда рассматривается как наиболее эффективный инструмент обеспечения высоких скоростей движения на дорогах высших категорий, требуемой безопасности взаимодействия потоков в зоне их слияния [13, 14]. В американском руководстве посредством технического регулирования дорожного движения MUTCD отмечаются особенности применения средств светофорного дозирования потока на рамповых развязках, в общих чертах сводящиеся к следующим принципам.

1. Значительно снижаются задержки транспортных средств, движущихся по магистрали, путем их «переноса» на рамповые потоки по причине увеличения времени их обслуживания на рампе, а также за счет повышения перепробега транспортных средств по альтернативным путям.

2. Возникает необходимость обеспечения дополнительного пространства для транспортных средств, скапливающихся на рампе.

3. Особое внимание необходимо уделить наличию альтернативных путей проезда с соответствующей пропускной способностью для обслуживания части потоков, не попавших на рампу.

4. Дозирование потоков применяется при наличии рекуррентных транспортных заторов, образующихся в связи с повышенным транспортным спросом на поездки, а также за счет несоответствующей условиям движения геометрии зоны переплетения потоков (отсутствие разгонно-переходной полосы и т. д.).

Основной принцип управления доступом заключается в регулировании транспортного спроса на магистраль с применением некоторого алгоритма, входными параметрами которого являются: интенсивность движения магистрального потока, скорости движения, уровень загруженности верхней и нижней частей зоны слияния потоков. Максимальная практическая пропускная способность рамповой полосы составляет 900 авт./ч с практическим минимумом 240 авт./ч.

При разработке алгоритма управления доступом к сети авторы исходили из того, что при использовании системы управления доступом к магистрали в качестве механизма повышения эффективности ее функционирования является обеспечение согласования характеристик при-

бытия и убытия транспортных средств с рампы. При этом система дозирования рампового потока должна гарантировать эффективность работы всех сегментов магистрали, из которых она состоит (рис. 2).

Алгоритм управления транспортным спросом может быть сведен к решению следующей прикладной задачи. Магистраль разбивается на несколько j -х сегментов, в каждом из которых имеется хотя бы одна питающая рампа.

Значение основного магистрального потока задается следующей зависимостью:

$$q_j = \sum_{i=1}^j \alpha_{ij} s_i, \quad \alpha_{ij} \in [0, 1],$$

где q_j – значение величины транспортного потока на j -й магистральной секции; s_i – величина вливающегося потока с i -й рампы, авт./ч; α_{ij} – доля i -го рампового потока, проходящего по j -й магистральной секции.

Условие предупреждения транспортного затора на магистрали сводится к выполнению следующего ограничения:

$$q_j \leq c_j, \forall j,$$

где c_j – пропускная способность j -й магистральной секции.

Вместе с этим величина дозирующего рампового потока ограничивается условием

$$s_{i,\min} \leq s_i \leq \min\{s_{i,\max}, d_i\},$$

где d_j – транспортный спрос на i -й рампе; $s_{j,\max}$ – пропускная способность i -й рампы.

Таким образом, оптимальное управление доступом к магистрали может соответствовать решению задачи квадратичного программирования, направленной на минимизацию длин очередей транспортных средств на прилегающих рампах при следующих смешанных ограничениях:

$$q_j \leq c_j, \forall j;$$

$$q_j \leq \sum_{i=1}^j \alpha_{ij} s_i;$$

$$s_{i,\min} \leq s_i \leq \min\{s_{i,\max}, d_i\}.$$

Решение указанной задачи реализовано в виде m -файла с применением программного комплекса Optimization Toolbox пакета MatLab R2013 в следующей постановке:

$$\min \left(\frac{1}{2} x' H x + f' x \right),$$

при ограничениях:

$$A x \leq b;$$

$$Aeq \cdot x = beq$$

и двусторонних ограничениях:

$$lb \leq x \leq ub,$$

где x – вектор оцениваемых параметров, $m \times 1$, $x \geq 0$; H – матрица Гессе, $m \times m$; f – то же коэффициенты целевой функции, $m \times 1$; A – матрица коэффициентов ограничений-неравенств, $n \times m$; Aeq – то же коэффициенты линейных ограничений-равенств, $n \times m$; b – вектор правых частей ограничений-неравенств, $n \times 1$, $b \geq 0$; beq – то же правых частей линейных ограничений-равенств, $n \times 1$; lb – то же нижних ограничений параметров, $m \times 1$, $lb \geq 0$; ub – то же верхних ограничений, $m \times 1$, $ub \geq 0$.

Матрица Гессе является симметричной и положительно определенной, элементы матрицы h_{ij} равны второй частной производной. Соответственно целевая функция должна быть выпуклой и дифференцируема. В рассматриваемой задаче управления доступом к улично-дорожной сети целевая функция является суммой квадратов остатков очередей транспортных средств, следовательно, функция дифференцируема и положительно определена.

$$H(f) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} \end{bmatrix}.$$

В качестве основного управляющего параметра выбраны значения объемов дозирования транспортных потоков с примыкающих рамп при выполнении следующих условий:

- не допустить перегрузки сегментов магистрали;
- максимально сократить суммарную длину очереди на примыкающих рампах.

При наличии объективной информации об условиях движения транспортного потока на каждом из сегментов магистрали (интенсивность/плотность) предлагаемый алгоритм позволяет выполнять оценку вероятности начала образования затора, по значениям рампового потока, основываясь на критерии «плотность транспортных средств на полосу движения». Для каждого магистрального сегмента представлены граничные значения величин плотности движения, при которых условия движения магистрального потока могут рассматриваться как наихудшие, способствующие высокой вероятности образования затора (табл. 1).

Прежде всего необходимо отметить очевидное преимущество предлагаемой модели: матрица A имеет размерность $n > m$ – полный ранг, следовательно, задача имеет единственный локальный минимум, совпадающий с глобальным. Нужно также отметить очевидное влияние на плотность движения верхнего ограничения vub , характеризующего пропускную способность примыкающих рамп. Указанное ограничение может использоваться как эффективный инструмент управления дорогами высших категорий в контексте применения следующей известной зависимости:

$$s_i = \frac{c_i C_i}{g_i},$$

где s_i – величина потока насыщения i -й рампы, авт./ч; c_i – то же пропускной способности i -й рампы, авт./ч; C_i – то же длительности цикла режима регулирования на i -й рампе, с; g_i – длительность обслуживающего такта рамповой полосы, с.

С учетом вышеизложенного, принимая во внимание зарубежный опыт применения RMS-систем, можно воспользоваться практическими рекомендациями, представленными в руководстве HCM 2010 (табл. 1), на основании которых использовать следующие системы дозирования потоков: одно транспортное средство за разрешающий такт g_i или несколько. Принимая во внимание качество исходных данных и их влияние на параметры управления магистралью, очень важно обладать точной информацией о распределении транспорт-

ных потоков внутри магистрального коридора. Как показали результаты тестирования модели, большое влияние на качество управляющего воздействия оказывают:

- фактические значения пропускной способности сегментов магистрали b_j ;
- матрица A , характеризующая распределение рамповых потоков внутри магистрали (коридорный вход-выход).

Такую информацию можно получить расчетом существующей матрицы корреспонденций рамповых потоков на основе проведения опроса участников о маршрутах движения или регистрацией транспортных средств, что является чрезвычайно дорогой, трудоемкой, а часто и невыполнимой задачей.

ВЫВОДЫ

1. Обособленное скоростное движение на магистральных улицах в условиях плотного движения можно обеспечить за счет ограничения въезда на магистраль, другими словами, за счет управления транспортным спросом. В практике управления доступом к сети следует уделять внимание адаптивным методам управления транспортным спросом на скоростных магистралях. Основной задачей при управлении доступом к сети является снижение воздействия примыкающего/входящего на магистраль потока с целью предупреждения образования сетевых транспортных заторов.

2. На основании проведенных исследований разработаны методики оценки:

- пропускной способности для сегментов магистрали (рис. 2) с учетом возможных вариантов взаимодействия потоков;
- матриц корреспонденций рамповых потоков с учетом используемых методов фиксации разрывов в потоке, на алгоритме генетической оптимизации, являющемся наиболее устойчивым к вероятным ошибкам в исходных данных.

3. Как показали результаты тестирования модели, большое влияние на качество управляющего воздействия оказывают фактические значения пропускной способности сегментов магистрали и характеристики распределения рамповых потоков внутри магистрали (коридорный вход-выход).

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов, А. Ю. Современные тенденции проектирования и реконструкции улично-дорожных сетей / А. Ю. Михайлов, И. М. Головных. Новосибирск: Наука, 2004. 266 с.
2. Лагереv, Р. Ю. К вопросу управления транспортными потоками в условиях плотного городского движения / Р. Ю. Лагереv, С. Ю. Лагереv, И. Г. Карпов // Вестник ИргТУ. 2012. № 9 (68). С. 139–145.
3. Proactive Ramp Management under the Threat of Freeway-Flow Breakdown / L. Elefteriadou [et al.] // *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2009. Vol. 16. P. 4–14.
4. Lorenz, M. A. Probabilistic Approach to Defining Capacity and Breakdown / M. A. Lorenz, L. Elefteriadou // *Transportation Research Circular E-C018*. In: *Proceedings of the 4th International Symposium on Highway Capacity*, 27 June – 1 July 2000. P. 84–95.
5. Highway Capacity Manual (HCM) 2010 / National Research Council (U.S.). Transportation Research Board. Washington, DC.: Transportation Research Board (TRB) of the National Academies, 2010. Vol. 1–4.
6. Врубель, Ю. А. Определение потерь в дорожном движении / Ю. А. Врубель, Д. В. Капский, Е. Н. Кот. Минск: БНТУ, 2006. 240 с.
7. Lertworawanich, P. A. Methodology for Estimating Capacity at Ramp Weaves Based on Gap Acceptance and Linear Optimization / P. A. Lertworawanich, L. Elefteriadou // *Transportation Research, Part B: Methodological*. 2003. Vol. 37, Is. 5. P. 459–483.
8. Design, Field Implementation and Evaluation of Adaptive Ramp Metering Algorithms. / R. Horowitz [et al.] // *California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH)*. UC Berkeley: California Partners for Advanced Transportation Technology, 2005. UCB-ITS-PRR-2006-21.
9. Makigami, Y. On Ramp Control / Y. Makigami // *Concise Encyclopedia of Traffic and Transportation Systems*, ed. M. Papageorgiou. Oxford: Pergamon Press, 2001. P. 285–289.
10. Papageorgiou, M. Freeway Ramp Metering: an Overview / M. Papageorgiou, A. Kotsialos // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2002. Vol. 3, No 4. P. 271–281.
11. Newman, L. Freeway Ramp Control – What it Can and Cannot Do / L. Newman, A. Dunnet, J. Meirs // *Freeway Operation Department, District 7: Los Angeles: California Division of Highways*. California, 1969. 23 p.
12. Papageorgiou, M. ALINEA: A Local Feedback Control Law for On-Ramp Metering / M. Papageorgiou, H. Hadj-Salem, J. Blosseville // *Transportation Research Record*. 1991. No 1320. P. 58–64.
13. Papageorgiou, M. Freeway Ramp Metering: an Overview / M. Papageorgiou, A. Kotsialos // *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, 2000. P. 228–239.
14. O'Brien, A. New Ramp Metering Algorithm Improves Systemwide Travel Time / A. O'Brien // *TR News*, Transportation Research Board. July–August 2000. P. 38–39.

Поступила 18.11.2014

Подписана в печать 21.01.2015

Опубликована онлайн 22.01.2016

REFERENCES

1. Mikhailov A. Yu., Golovnykh I. M. (2004) *Modern Tendencies in Designing and Reconstruction of Street and Road Networks*. Novosibirsk, Nauka. 266 p. (in Russian).
2. Lagerev R. Yu., Lagerev S. Yu., Karpov I. G. (2012) On the Problem of Transport Flow Control Under Conditions of Queuing Traffic. *Vestnik Irkutskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta* [Vestnik of Irkutsk State Technical University], 9 (68), 139–145 (in Russian).
3. Elefteriadou L., Kondyli A., Washburn S., Brilon W., Lohoff J., Jacobson L., Persaud B. (2009) Proactive Ramp Management under the Threat of Freeway-Flow Breakdown. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 16, 4–14. DOI: 10.1016/j.sbspro.2011.04.424.
4. Lorenz M. A., Elefteriadou L. (2000) Probabilistic Approach to Defining Freeway Capacity and Breakdown. *Proceedings of the 4th International Symposium on Highway Capacity*, 27 June – 1 July 2000, 84–95.
5. National Research Council (U.S.). Transportation Research Board. (2010) *Highway Capacity Manual (HCM) 2010*. Washington, DC, Transportation Research Board (TRB) of the National Academies, Vol. 1–4.
6. Vruble Yu. A., Kapsky D. V., Kot E. N. (2006) *Determination of Losses in Road Traffic*. Minsk: BNTU. 240 p. (in Russian).
7. Lertworawanich P. A., Elefteriadou L. (2003) Methodology for Estimating Capacity at Ramp Weaves Based on Gap Acceptance and Linear Optimization. *Transportation Research, Part B: Methodological*, 37 (5), 459–483. Doi: 10.1016/S0191-2615(02)00024-3.
8. Horowitz R., May A., Skabardonis A., Varaiya P., Zhang M., Gomes G. (2005) Design, Field Implementation and Evaluation of Adaptive Ramp Metering Algorithms. *California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH)*. UC Berkeley: California Partners for Advanced Transportation Technology. UCB-ITS-PRR-2006-21. Doi: escholarship.org/uc/item/5p06q6k5.
9. Makigami Y. (2001) On Ramp Control. *Concise Encyclopedia of Traffic and Transportation Systems*. Oxford: Pergamon Press, 285–289.
10. Papageorgiou M., Kotsialos A. (2002) Freeway Ramp Metering: an Overview. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 3 (4), 271–281. Doi: 10.1109/TITS.2002.806803.
11. Newman L., Dunnet A., Meirs J. (1969) *Freeway Ramp Control – What it Can and Cannot Do*. Los Angeles: California Division of Highways, District 7. 23 p.
12. Papageorgiou M., Hadj-Salem H., Blosseville J. M. (1991) ALINEA: A Local Feedback Control Law for On-Ramp Metering. *Transportation Research Record*, (1320), 58–64.
13. Papageorgiou M., Kotsialos A. (2000) Freeway Ramp Metering: an Overview. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, 228–239.
14. O'Brien A. (2000) New Ramp Metering Algorithm Improves Systemwide Travel Time. *TR News*, July–August, 38–39.

Received: 18.11.2014

Accepted: 21.01.2015

Published online: 22.01.2016