

УДК 004.94:[656.02 + 351.811.12]

ОРГАНИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ НА КОЛЬЦЕВОМ ПЕРЕСЕЧЕНИИ В УСЛОВИЯХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Наумова Н.А., Домбровский А.Н.

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», Краснодар,
e-mail: Nataly_Naumova@mail.ru

Обострение транспортных проблем особенно заметно в узловых точках улично-дорожной сети. К преимуществам кольцевых пересечений в одном уровне относятся: снижение потерь времени на пересечении, лучшие условия выполнения разворота и левого поворота, ликвидация конфликта встречных потоков, большая пропускная способность, снижение аварийности. Неравномерность движения автотранспорта сказывается на степени эффективности организации движения в местах пересечения транспортных потоков, в том числе и на кольцевых пересечениях. Разработана авторская математическая модель движения транспортных средств на кольцевых пересечениях, в котором кольцевое пересечение рассматривается как совокупность конфликтных точек и дуг между ними. Предложены методы оценки транспортных затрат при различных схемах организации движения на кольцевых пересечениях. Разработан метод динамического определения наиболее эффективного способа организации движения на кольцевом пересечении в условиях функционирования интеллектуальных транспортных систем.

Ключевые слова: кольцевое пересечение, организация движения, математическая модель, динамическое управление

THE TRAFFIC MANAGEMENT AT THE CIRCULAR INTERSECTION IN OPERATING CONDITIONS OF INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS

Naumova N.A., Dombrovskiy A.N.

Kuban State Technological University, Krasnodar, e-mail: Nataly_Naumova@mail.ru

Aggravation of transport problems is especially noticeable in nodes of a street road network. Advantages of circular intersection are decrease in losses of time on crossing, the best conditions of performance of a turn back and the left turn, elimination of the conflict of counter flows, bigger capacity, decrease in accident rate. The unevenness of traffic is reflected in degree of efficiency of the organization of the movement in places of crossing of traffic flows including on circular intersection. Authors have developed mathematical model of the movement of vehicles on circular intersection. In it circular intersection is considered as set of conflict points and links between them. Methods of assessment of transport expenses at various schemes of the organization of the movement on circular intersection was offered. The method of dynamic definition of the most effective way of the organization of the movement on circular intersection in operating conditions of the intelligent transportation systems was developed.

Keywords: circular intersection, traffic management, mathematical model, dynamic control

Обострение транспортных проблем, вызванное увеличением интенсивности движения автомобилей, особенно заметно в узловых точках сети и проявляется в росте величины задержек транспортных средств, в появлении заторов, излишнем расходе топлива, ухудшении экологической ситуации, снижении безопасности движения. С целью повышения безопасности движения и увеличения пропускной способности в двадцатых годах прошлого столетия в зарубежных странах начали устраивать кольцевые пересечения [1]. В 1960-х годах первые кольцевые пересечения появились и в СССР. К преимуществам кольцевых пересечений в одном уровне можно отнести, например, снижение потерь времени на пересечении, лучшие условия выполнения разворота и левого поворота, ликвидация конфликта встречных потоков, большая пропускная способность, снижение аварийности.

Существуют различные типы кольцевых пересечений и различные схемы организации движения на них [2]. Исследования в этой области проводятся как зарубежными [3, 4], так и российскими учеными [5]. В большинстве случаев существующая архитектурная застройка городов не позволяет менять планировочные решения. Однако неравномерность движения автотранспорта сказывается на степени эффективности организации движения в местах пересечения транспортных потоков, в том числе и на кольцевых пересечениях. И повлиять на эту ситуацию можно с помощью изменения организации движения по мере необходимости. Совершенствование схем организации движения позволяет находить решение транспортных проблем без больших материальных затрат.

Развитие автоматизированных систем управления дорожным движением в рамках интеллектуальных транспортных систем

(ИТС) дает возможность в режиме on-line реагировать на изменение дорожной ситуации.

Математическая модель движения транспортных средств на кольцевых пересечениях

Существуют две основные группы моделей кольцевых пересечений: эмпирические и аналитические (вероятностные). Эмпирический подход основан на получении регрессионных моделей, которые оценивают пропускную способность второстепенного направления по экспериментальным данным об интенсивности главного потока. Регрессионные модели применяют в Великобритании и ФРГ.

Аналитические методы по виду распределения интервалов между автомобилями в потоке, используя аппарат теории вероятностей и теории случайных процессов, определяют средние характеристики качества организации движения на кольцевом пересечении. Их применяют, например, в США, Австралии, Финляндии.

В работе [6] авторами предложена аналитическая модель движения транспортных средств на кольцевом пересечении в одном уровне, которая включена в общую модель TIMeR Mod (Transportation Intelligent Mesoscopic Real-time Model). Базовой гипотезой для разработки модели является гипотеза о распределении интервалов по времени между транспортными средствами по обобщенному закону Эрланга. Авторами было экспериментально доказано, что эмпирическое распределение интервалов в транспортном потоке хорошо согласуется с этим распределением при широком диапазоне интенсивностей.

Кольцевое пересечение в модели TIMeR Mod рассматривается как совокупность конфликтных точек и дуг между ними. В случае кольцевого саморегулируемого движения на кольце средняя задержка (в секундах) в каждой конфликтной точке одного транспортного средства выбранного второстепенного направления A с учетом очереди равна

$$W_H = m_z \cdot (1 + M(l)), \tag{1}$$

где

$$m_z = \frac{\left(\sum_i a_{i1} \lambda_{i1} \cdot \frac{2}{\lambda_{i1}^3} \right)}{2 \cdot \left(\sum_{i=0}^{k_1-1} \frac{1}{\lambda_{01}} \right)} \cdot \Phi_0(T_0) + \left(\sum_{i=0}^{k_1-1} \frac{1}{\lambda_{01}} \right) \cdot \Phi_0(T_0) \cdot \Phi(T_0) \cdot \frac{1}{(1 - \Phi(T_0))},$$

$$\Phi_0(T_0) = 1 - \prod_{j=1}^L \left(\frac{1}{\sum_{i=0}^{k_j-1} \frac{1}{\lambda_{0j}}} \cdot \sum_{i=0}^{k_j-1} a_{ij} \cdot \frac{1}{\lambda_{ij}} \cdot e^{-\lambda_{ij} T_0} \right),$$

$$\Phi(T_0) = 1 - \left(\sum_{i=0}^{k_1-1} a_{i1} e^{-\lambda_{i1} T_0} \right) \prod_{j=2}^L \left(\frac{1}{\sum_{i=0}^{k_j-1} \frac{1}{\lambda_{0j}}} \cdot \sum_{i=0}^{k_j-1} a_{ij} \cdot \frac{1}{\lambda_{ij}} \cdot e^{-\lambda_{ij} T_0} \right)$$

$$M(l) = bp_0 \frac{\alpha^2}{(1 - \alpha)^2} - \text{среднее число автомобилей в очереди}, \tag{2}$$

$k, \lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{k-1}$ – параметры обобщенного закона Эрланга для выбранного потока A , входящего в конфликтную точку;

$k_j, \lambda_{0j}, \lambda_{1j}, \dots, \lambda_{k_j-1,j}$ – параметры обобщенного закона Эрланга для каждого из L конфликтных для потока A транспортных потоков;

T_0 – приемлемый временной интервал между автомобилями в конфликтных потоках для продолжения движения транспортными средствами потока A .

Все необходимые для расчетов данные содержатся в матрицах $A_{STREETS}$ и $B_{INTERSECTION}$ модели TИMeR_Mod.

Для определения времени прохождения транспортным средством кольцевого пересечения с помощью модели TИMeR_Mod необходимо иметь следующие данные:

- количество въездов на кольцо (A, B, C, D, \dots – по часовой стрелке);
- организация движения (вариант 1–4);
- скорость движения на кольце;
- на векторах AB, BC, CD, \dots : количество полос, интенсивность; главное или второстепенное движение.

Ниже приведены варианты построения функции транспортных затрат на кольце при различных схемах организации движения [2] на нем для наиболее часто встречающейся ситуации пересечения двух дорог:

$$G_p(x) = \sum_{l \in L} \theta_{lp} (\tau_l(y) + \tau_z(y)), \quad (3)$$

где $\tau_l(y)$ – затраты на прохождение дуги y между двумя конфликтными точками, $\tau_z(y) = W_{Hl}$ – средняя задержка в данной конфликтной точке.

Вариант 1. Организация движения с предоставлением преимущественного права проезда транспортным средствам, движущимся по кольцевой проезжей части.

$$- G_p(x) = \tau_z(A) + \tau_l(AB) + \tau_z(B) = \tau_z(A) + \frac{l(AB)}{v(AB)} + \tau_z(B) \text{ – при повороте направо;}$$

$$- G_p(x) = \tau_z(A) + \tau_l(AB) + \tau_z(B) + \tau_l(BC) + \tau_z(C) = \tau_z(A) + \frac{l(AB)}{v(AB)} + \tau_z(B) + \frac{l(BC)}{v(BC)} + \tau_z(C) \text{ – при движении прямо;}$$

$$- G_p(x) = \tau_z(A) + \tau_l(AB) + \tau_z(B) + \tau_l(BC) + \tau_z(C) + \tau_l(CD) + \tau_z(D) = \tau_z(A) + \frac{l(AB)}{v(AB)} + \tau_z(B) + \frac{l(BC)}{v(BC)} + \tau_z(C) + \frac{l(CD)}{v(CD)} + \tau_z(D) \text{ – при повороте налево.}$$

Величина $\tau_z(y)$ равна нулю, если движение транспортного средства проходит по главному направлению. Если по второстепенному, то $\tau_z(y)$ рассчитывается по формуле (1) для узловой точки I типа (нерегулируемое пересечение требований).

Вариант 3. Ни одно из направлений движения не выделено как главное. Водители должны руководствоваться «Правилами дорожного движения» и уступать дорогу

$$- G_p(x) = \tau_l(AB) = \frac{l(AB)}{v(AB)} \text{ – при повороте направо;}$$

Конфликтная точка – точка слияния потоков на въезде на кольцо. Главное направление – движение по кольцу. Для определения величины $\tau_z(y)$ применяется разработанный авторами аналитический аппарат (формула (1) для узловой точки I типа – нерегулируемое пересечение).

Величина $\tau_l(y)$ рассчитывается следующим образом (с точностью до обозначений, A – точка въезда на кольцо):

$$\tau_l(y) = \frac{l(AB)}{v(AB)} \text{ – поворот направо;}$$

$$\tau_l(y) = \frac{l(AB) + l(BC)}{v(AB)} \text{ – движение прямо;}$$

$$\tau_l(y) = \frac{l(AB) + l(BC) + l(CD)}{v(AB)} \text{ – поворот налево.}$$

Здесь приняты следующие обозначения: $l(M_1M_2)$ – длина участка M_1M_2 ; $v(M_1M_2)$ – скорость на участке M_1M_2 .

Вариант 2. Организация движения с предоставлением преимущественного права проезда по одной из пересекающихся дорог. Главная дорога проходит в прямом направлении.

Пусть с точностью до обозначений, A – точка въезда на кольцо. Тогда функция транспортных затрат определяется следующим образом:

транспортным средствам, приближающимся справа. По этому варианту организации движения приоритетом в движении в зоне слияния кольцевых пересечений пользуется поток, входящий на пересечение.

В этом случае въезд на кольцо – без задержек. Пусть опять с точностью до обозначений, A – точка въезда на кольцо. Тогда функция транспортных затрат определяется следующим образом:

$$- G_p(x) = \tau_l(AB) + \tau_{lz}(B) + \tau_l(BC) = \frac{l(AB)}{v(AB)} + \tau_{lz}(B) + \frac{l(BC)}{v(BC)} - \text{при движении прямо};$$

$$- G_p(x) = \tau_l(AB) + \tau_{lz}(B) + \tau_l(BC) + \tau_{lz}(C) + \tau_l(CD) = \frac{l(AB)}{v(AB)} + \tau_{lz}(B) + \frac{l(BC)}{v(BC)} + \tau_{lz}(C) + \frac{l(CD)}{v(CD)} - \text{при}$$

повороте налево.

Вариант 4. Организация движения на кольцевом пересечении, когда главная дорога изменяет свое направление. Этот вариант организации движения на кольцевых пересечениях применяется сравнительно редко.

В данном случае схема расчетов аналогична варианту 2. *A* – точка въезда на кольцо (с точностью до обозначений). Тогда функция транспортных затрат определяется следующим образом:

$$- G_p(x) = \tau_{lz}(A) + \tau_l(AB) + \tau_{lz}(B) = \tau_{lz}(A) + \frac{l(AB)}{v(AB)} + \tau_{lz}(B) - \text{при повороте направо};$$

$$- G_p(x) = \tau_{lz}(A) + \tau_l(AB) + \tau_{lz}(B) + \tau_l(BC) + \tau_{lz}(C) = \tau_{lz}(A) + \frac{l(AB)}{v(AB)} + \tau_{lz}(B) + \frac{l(BC)}{v(BC)} + \tau_{lz}(C) - \text{при}$$

движении прямо;

$$- G_p(x) = \tau_{lz}(A) + \tau_l(AB) + \tau_{lz}(B) + \tau_l(BC) + \tau_{lz}(C) + \tau_l(CD) + \tau_{lz}(D) = \tau_{lz}(A) + \frac{l(AB)}{v(AB)} + \tau_{lz}(B) + \frac{l(BC)}{v(BC)} + \tau_{lz}(C) + \frac{l(CD)}{v(CD)} + \tau_{lz}(D) - \text{при повороте налево.}$$

Величина $\tau_{lz}(y)$ равна нулю, если движение транспортного средства проходит по главному направлению. Если по второстепенному, то $\tau_{lz}(y)$ рассчитывается по формуле (1).

Варианты 1 и 3 организации движения также укладываются в схему расчетов для вариантов организации движения 2 и 4. Поэтому при составлении базы данных, описывающей кольцевое пересечение, достаточно указывать пункт «– на векторах *AB, BC, CD, ...* : количество полос, параметры распределения обобщенного закона Эрланга для интервалов; главное или второстепенное движение».

Управление в динамическом режиме

Для обеспечения эффективной организации движения недостаточно иметь авто-

мобильную дорогу с заданными техническими характеристиками и оборудованную необходимой дорожной информацией. Необходимо кроме этого гибкая система управления, позволяющая реагировать на изменения в режиме движения и прогнозировать оптимальные схемы организации движения транспортных средств. Транспортным потоком можно управлять с помощью изменения параметров движения, изменения направления движения. Это возможно делать с помощью управляемых дорожных знаков на базе световодов или светодиодов. К критериям, с помощью которых можно определять эффективность той или иной организации движения, можно отнести задержки, длину очереди, время проезда, количество вынужденных остановок.

Структура базы данных для моделирования движения на кольцевом пересечении

К-во въездов на кольцо	Скорость движения на кольце	Дуга АВ			Дуга ВС			...
		К-во полос	Параметры распределения интервалов	Приоритет	К-во полос	Параметры распределения интервалов	Приоритет	
								...

В работе [5] изучены критерии эффективности различных схем организации движения на саморегулирующихся кольцевых пересечениях. Рассматривались четырехлучевые кольцевые пересечения с диаметром центрального направляющего островка от 30 до 80 метров. Для них определены границы применения одного из четырех (см. выше) вариантов организации движения. В качестве критериев выбраны средняя задержка и длина очереди. Методика выбора представлена в работе [5, с. 111–112]. Кольцевое пересечение рассматривается как совокупность четырех въездов на кольцо, то есть как комплекс четырех Т-образных примыканий. На каждом въезде определяется вариант организации движения: приоритет кольцевому потоку или приоритет въезжающему потоку.

Информация о состоянии транспортных потоков на улично-дорожной сети, необходимая для расчетов в рамках модели TIMeR Mod, содержится в матрицах $A_{STREETS}$ и $B_{INTERSECTION}$. Ранее авторами описаны методы сбора с помощью видеорегистраторов необходимой для данных матриц информации и ее обновления в динамическом режиме [7]. С целью обновления информации о состоянии транспортных потоков и его прогнозирования на следующий краткосрочный период времени применяется фильтрация Кальмана. На каждом этапе прогнозируемые данные корректируются с помощью данных, полученных путем непосредственных измерений. В результате по имеющейся информации о состоянии транспортных потоков на кольцевом пересечении для определения наиболее эффективного в текущий момент способа организации движения предлагается действовать по следующему алгоритму:

– по формулам (1) и (2) определить среднюю задержку и длину очереди в выбранном узле;

– по алгоритму [5, с. 111–112] определить организацию движения на данном въезде на кольцо;

– отобразить необходимую информацию в базах данных $A_{STREETS}$ и $B_{INTERSECTION}$;

– отобразить необходимую информацию на управляемых дорожных знаках.

Заключение

В условиях ИТС возможна гибкая система управления движением на саморегулирующихся кольцевых пересечениях. Имея информацию, поступающую с видеорегистраторов и отраженную в матрицах $A_{STREETS}$ и $B_{INTERSECTION}$, возможно в динамическом режиме управлять движением, выбирая наиболее оптимальный вариант. Управление в режиме on-line позволяет реагировать на текущую обстановку в транспортной сети и выбирать наиболее эффективный способ организации движения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ и администрации Краснодарского края, проект № 16-48-230720 p_a.

Список литературы

1. Липницкий А.С. Современные кольцевые пересечения / А.В. Зедгенизов, Р.Ю. Лагерева, А.Г. Левашев, А.С. Липницкий, А.Ю. Михайлов, М.И. Шаров // Иркутский государственный технический университет. – Иркутск, 2009. – 106 с.
2. Свод правил по проектированию геометрических элементов автомобильных дорог и транспортных пересечений. Часть 2: Свод правил по проектированию геометрических элементов транспортных пересечений автомобильных дорог // Федеральное дорожное агентство (Росавтодор). – М., 2013. – 212 с.
3. Flannery A., Kharoufeh J.P., Gautam and Elefteriadou L. Queuing delay models for single-lane roundabouts // Civil Engineering and Environment Systems. – 2008. – Vol. 22, No. 3. – P. 1333–150.
4. Robinson B.W. and other. Roundabouts: An Informational Guide // U.S. Department of Transportation. – Publication No. FHWA-RD-00-067. – 2010. – P. 284.
5. Поздняков М.Н. Совершенствование организации дорожного движения на кольцевых пересечениях: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10. – Ростов н/Д, 2005. – 164 с.
6. Наумова Н.А., Данович Л.М., Карачанская Т.А. Аналитическая модель движения автотранспортных средств на кольцевых пересечениях // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 6–1. – С. 94–97.
7. Naumova N.A. Method for Estimating An Origin-Destination Matrix for Dynamic Assignment // International Journal of Control Theory and Applications. – 2016. – Vol. 9 (30). – P. 129–138.