

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ, ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ

© 2018 О.К. Головнин

Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королева

Статья поступила в редакцию 12.12.2018

Применение современных технических систем управления дорожным движением способствует повышению безопасности и устойчивости функционирования транспортного комплекса. Важно разрабатывать модели транспортной инфраструктуры, обладающие возможностью интеграции с техническими системами управления движением и позволяющие учитывать управляющие воздействия технических средств организации дорожного движения и воздействия окружающей среды на транспортные потоки, их взаимное влияние друг на друга, что приводит к необходимости учета как семантических (атрибутных), так и пространственных характеристик. Таким образом, цель работы заключается в моделировании объектов, процессов и явлений транспортной инфраструктуры с учетом их пространственных характеристик в технических системах управления движением на основе методов системного анализа. Проведена декомпозиция предметной области – модель предметной области представлена моделями транспортного процесса, улично-дорожной сети, технических средств организации дорожного движения, инцидентов, придорожных объектов и окружающей среды. Разработаны программные модули для интеллектуальной транспортной системы ITSGIS, реализующие предложенные модели. В ITSGIS проведено имитационное моделирование, использующее гетерогенные источники информации при идентификации моделей. С использованием предложенных моделей проведено аналитическое моделирование на основе гидродинамического подхода к описанию транспортного потока: показано влияние плановых инцидентов и погодных условий на пропускную способность участка улично-дорожной сети, влияние придорожных объектов на интенсивность транспортных потоков. Применение синтезированных моделей объектов, процессов и явлений транспортной инфраструктуры в передовых технических системах управления дорожным движением позволит организовать эффективное управление транспортными потоками с канализированием во времени и пространстве, оценить изменение скорости, плотности, интенсивности транспортных потоков, рассчитать транспортные задержки, выявить образование очередей и заторовых ситуаций, возникающих под воздействием различных дорожных, организационных и погодных факторов.

*Ключевые слова:* управление транспортными потоками, моделирование транспортной инфраструктуры, модель транспортного потока.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Применение современных технических систем управления дорожным движением способствует повышению безопасности и устойчивости функционирования транспортного комплекса, обеспечению комфортности для водителей и пользователей транспорта, улучшению экологии, росту грузо- и пассажирооборота [1, 2].

Передовые технические системы управления дорожным движением включают в себя [3-5]: технологии информационного взаимодействия Vehicle-to-Infrastructure, Vehicle-to-Vehicle, Vehicle-to-Everything, автоматизированные системы управления дорожным движением (АСУДД) и интеллектуальные транспортные системы (ИТС). В основу перечисленных систем заложены современные достижения и инновации

*Головнин Олег Константинович, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем и технологий. E-mail: golovnin@bk.ru*

в области управления транспортными потоками (ТрП), что обеспечивает управление в режиме реального времени [6]. Технические системы управления дорожным движением оперируют данными, получаемыми с измерительных приборов и датчиков присутствия, видеокамер, радарных детекторов и метеостанций в сочетании с динамическим имитационным и аналитическим моделированием [7].

Используемые в технических системах управления движением модели объектов, процессов и явлений транспортной инфраструктуры (ТрИ) имеют ряд недостатков [8-10]: отсутствие интеграции моделей ТрП и управляющих устройств, отсутствие возможностей использовать широкий набор параметров мониторинга и отсутствие принятых механизмов взаимодействия. Важно разрабатывать модели, обладающие возможностью интеграции с ИТС и АСУДД, позволяющие учитывать управляющие воздействия окружающей среды и технических средств организации

дорожного движения (ТСОДД) на ТрП, взаимное влияние ТСОДД друг на друга и на ТрП, влияние окружающей среды на применяемые ТСОДД и их характеристики, что приводит к необходимости учета как семантических (атрибутивных), так и пространственных характеристик.

Моделирование сложных систем, к классу которых относят транспортную систему, требует применения методов системного анализа, позволяющих выявить объекты предметной области, описать их классы и отношения между ними, определить регламент отношений, соподчиненность и взаимное влияние [11]. Таким образом, цель работы – моделирование объектов, процессов и явлений ТрИ с учетом их пространственных характеристик в технических системах управления движением на основе методов системного анализа.

## 2. МОДЕЛИ ОБЪЕКТОВ, ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Проведена декомпозиция предметной области с позиций системного анализа с учетом [12]. Модель предметной области, описанная в [13], модифицирована и дополнена для учета влияния процессов и явлений, проходящих в ТрИ:

$$M_{\text{ТрО}} = \langle M_{\text{ТрПр}}, M_{\text{УДС}}, M_{\text{ТСОДД}}, M_{\text{И}}, M_{\text{ДО}}, M_{\text{ОкрС}} \rangle,$$

где  $M_{\text{ТрПр}}$  – модель транспортного процесса;  
 $M_{\text{УДС}}$  – модель улично-дорожной сети (УДС);  
 $M_{\text{ТСОДД}}$  – модель технических средств организации дорожного движения;  
 $M_{\text{И}}$  – модель инцидента;  
 $M_{\text{ДО}}$  – модель придорожного объекта;  
 $M_{\text{ОкрС}}$  – модель окружающей среды.

### 2.1. Модель транспортного процесса

Модель транспортного процесса описывается состоянием всех ТрП  $\tilde{S} = \{\tilde{s}_i\}$  на УДС в момент времени  $t_i$ . Для описания ТрП используется макроскопическая гидродинамическая модель ТрП, оперирующая средней скоростью  $v^{\tilde{e}_i}$ , плотностью  $k^{\tilde{e}_i}$  и интенсивностью  $I^{\tilde{e}_i}$  ТрП. ТрП движется по ориентированным ребрам (дугам)  $\tilde{e}_i \in \tilde{E}$  графа УДС.

В качестве исходных данных для идентификации и калибровки модели  $\tilde{S}$  используются значения характеристик ТрП, полученные с помощью различных методов мониторинга [15-17]. Влияние на мониторинг характеристик ТрП оказывает состав ТрП  $\tilde{S}$ , который описывается типом транспортных средств (ТрС), входящих в него:  $type^s \in Type^s = \{\text{велосипед, мотоцикл, легковой\_автомобиль, грузовой\_автомобиль, общественный\_транспорт}\}$ . В рамках применяе-

мой макроскопической модели ТрП состав ТрП однороден и приводится к типу легковой\_автомобиль с помощью коэффициентов (множителей)  $k_i^{\tilde{S}}$ , зависящих от типа ТрС [14].

Характеристики ТрП фиксируются как параметры фундаментальных диаграмм (триада  $I_C^{\tilde{e}_i}, v_0^{\tilde{e}_i}, v_w^{\tilde{e}_i}$ ) для дуг  $\tilde{e}_i \in \tilde{E}$  графа УДС:

- $I_C^{\tilde{e}_i}$  – максимальная пропускная способность участка УДС;
- $v_0^{\tilde{e}_i}$  – скорость свободного движения;
- $v_w^{\tilde{e}_i}$  – скорость распространения затора.

Другой способ построить фундаментальную диаграмму – задать триаду  $I_C^{\tilde{e}_i}, k_C^{\tilde{e}_i}, k_J^{\tilde{e}_i}$ :

- $I_C^{\tilde{e}_i}$  – максимальная пропускная способность участка УДС;
- $k_C^{\tilde{e}_i}$  – критическая плотность ТрП;
- $k_J^{\tilde{e}_i}$  – максимальная плотность ТрП (заторовое состояние).

### 2.2. Модель улично-дорожной сети

Для описания модели УДС используется триада [12, 13]: участок УДС, узел, дуга. Под участком будем понимать полигональный сегмент УДС, описываемый единым набором атрибутов. Обозначим множество участков  $\Theta = \{\theta_i^X\}$ . Множество участков  $\Theta$ , предложенное в [13] и содержащее подмножества перегонов  $\Theta^L \subset \Theta$ , перекрестков  $\Theta^S \subset \Theta$ , пешеходных переходов  $\Theta^P \subset \Theta$  и железнодорожных переездов  $\Theta^R \subset \Theta$ , дополним множествами путепроводов  $\Theta^O \subset \Theta$  и тоннелей  $\Theta^U \subset \Theta$  для их описания в пространстве планарным графом.

Каждому участку УДС  $\theta_i^X \in \Theta$  поставим в соответствие набор атрибутов: наличие центральной разделительной полосы на участке; общее количество полос движения на участке; ширина полосы движения; ширина обочины; ширина краевой полосы у обочины; ширина краевой полосы безопасности у разделительной полосы; ширина земляного полотна; тип дорожного покрытия; является ли участок выездом с прилегающей территории.

Двум граничащим соседним участкам УДС поставим в соответствие два узла; двум узлам поставим в соответствие одну дугу, соединяющую их и имеющую направление; одному узлу всегда соответствует хотя бы одна дуга, входящая или выходящая из него. Под дугой будем понимать элемент ориентированного графа, задающий направление движения ТрП на участке УДС. Обозначим множество дуг  $\tilde{E} = \{\tilde{e}_i\}$ . Каждой дуге  $\tilde{e}_i \in \tilde{E}$  поставим в соответствие вес дуги. В качестве веса дуги выбираем набор атри-

бутов, ассоциируемых с дугой  $\tilde{e}_i$ :

- $l^{\tilde{e}_i}$  – длина дуги;
- $n^{\tilde{e}_i}$  – количество полос движения в направлении движения ТрП;
- $I_C^{\tilde{e}_i}$  – пропускная способность дуги – максимальное значение интенсивности ТрП;
- $v_0^{\tilde{e}_i}$  – скорость свободного движения ТрП на участке  $\theta_j^x$  УДС;
- $v_w^{\tilde{e}_i}$  – скорость распространения затора на участке  $\theta_j^x$  УДС в направлении, которое является обратным к направлению дуги  $\tilde{e}_i$ .

Под узлом будем понимать вершину графа, расположенную на границе участка УДС, предназначенную для фиксации параметров ТрП и наложения ограничения на ТрП в части изменения направления, скорости или плотности. Обозначим множество узлов  $\tilde{V} = \{\tilde{v}_i\}$ . Каждому узлу  $\tilde{v}_i \in \tilde{V}$  поставим в соответствие вес узла – набор атрибутов объектов, ассоциированных с узлом  $\tilde{V}_i$ :

- $\mathbf{B}^{\tilde{v}_i}$  – распределительная матрица, которая устанавливает, каким образом входящие в узел  $\tilde{v}_i$  по дугам  $\tilde{e}_m$  ТрП распределяются между выходящими из узла  $\tilde{v}_i$  дугами  $\tilde{e}_n$  [18];
- $\Gamma^{\tilde{v}_i}$  – матрица изменения параметров ТрП при прохождении узла  $\tilde{v}_i$ ;
- $\Lambda^{\tilde{v}_i}$  – битовая маска, которая описывает факт изменения параметров ТрП при прохождении узла [19].

Матрица преобразования параметров транспортного потока  $\Gamma^{\tilde{v}_i}$  устанавливает, как изменяют свои характеристики ТрП, входящие в узел  $\tilde{v}_i$  по дугам  $\tilde{e}_m$  и выходящие из узла  $\tilde{v}_i$  по дугам  $\tilde{e}_n$ :

$$\Gamma^{\tilde{v}_i} = \begin{bmatrix} \gamma_{1,1} & \gamma_{1,2} \\ \gamma_{2,1} & \gamma_{2,2} \end{bmatrix}, \gamma_{i,j} \in \mathfrak{R}.$$

ТрП при прохождении узла  $\tilde{v}_i$  изменяет плотность  $k^{e_n} = \gamma_{1,1} \cdot k^{\tilde{e}_m} + \gamma_{1,2}$  и скорость движения  $v^{e_n} = \gamma_{2,1} \cdot v^{\tilde{e}_m} + \gamma_{2,2}$ . В случае, если ТрП при прохождении узла не изменяет своих характеристик:

$$\Gamma^{\tilde{v}_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

В случае, если ТрП не может пройти узел:

$$\Gamma^{\tilde{v}_i} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Узлы используются для моделирования точек изменения направления движения или разбиения участков УДС, исходя из атрибутов, характеризующих участок УДС:

- изменение направления движения ТрП на перекрестках (рис. 1);
- слияние ТрП (рис. 2);
- разветвление ТрП (рис. 3);
- разбиение протяженных перегонов УДС на менее протяженные;
- разбиение перегонов, имеющих повороты, на линейные участки (рис. 4).

На рис. 1–4 представлены модели, используемые для структурно-параметрического синтеза графа УДС.

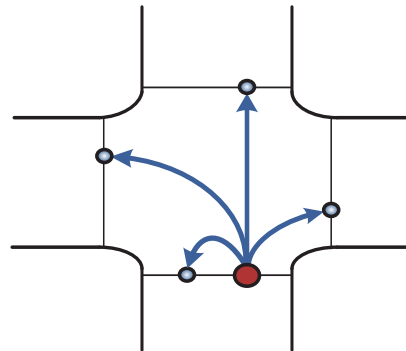


Рис. 1. Модель узла смены направления движения ТрП

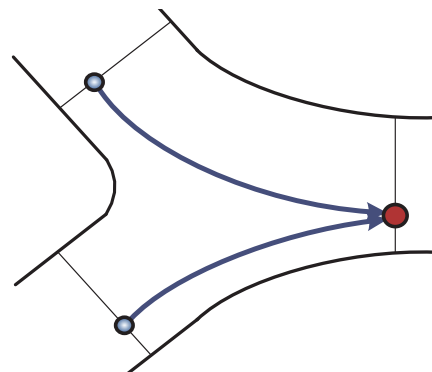


Рис. 2. Модель узла слияния ТрП

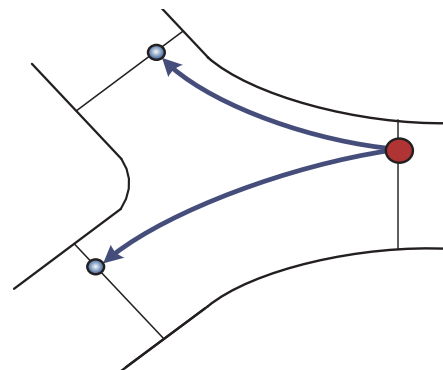


Рис. 3. Модель узла разветвления ТрП

Обычной дугой обозначим дугу, у которой в ее начальный узел входит хотя бы одна дуга, и из конечного узла исходит хотя бы одна дуга. Дуга называется въездом, если в начальный узел  $\tilde{v}_i^b$ , называемый истоком, не входит ни одна дуга (рис. 5).

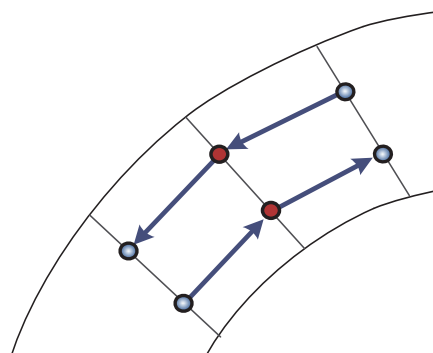


Рис. 4. Модель узлов формирования линейных перегонов

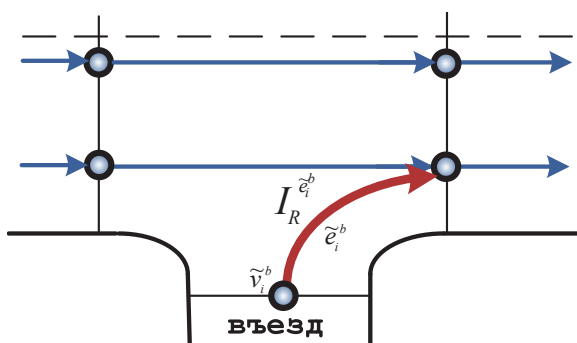


Рис. 5. Дуга-выезд

Обозначим въезд через  $\tilde{e}_i^b$ . Через въезды  $\tilde{e}_i^b$  ТрС попадают на УДС. С каждым въездом ассоциируется функция интенсивности ТрП, который попадает на УДС из въезда  $\tilde{e}_i^b$ .

Дуга называется выездом, если из ее конечного узла  $\tilde{v}_i^e$ , называемого стоком, не выходит ни одна дуга (рис. 6). Обозначим выезд через  $\tilde{e}_i^e$ . Через выезды ТрС покидают УДС. С выездом ассоциируется функция интенсивности ТрП  $I_R^{\tilde{e}_i^e}$ , который покидает УДС через выезд  $\tilde{e}_i^e$ .

Определим магистраль как упорядоченную совокупность участков  $\theta_j^X$  УДС различных типов. Например, магистралью является улица/автотрасса, пересекающая другие улицы/трассы, имеющая пересечения с железнодорожными путями в одном уровне. Тогда транспортная сеть – совокупность магистралей. В транспортную сеть должно входить минимум 2 магистрали. Магистрали в сети могут пересекать друг друга, однако это условие не является обязательным.

### 2.3. Модель технических средств организации движения

Множество ТСОДД, дислоцированных на УДС, обозначим  $\tilde{T} = \{\tilde{t}_i^X\}$ . Множество ТСОДД, предложенное в [13] и содержащее подмножества дорожных знаков  $\tilde{T}^Z \subset \tilde{T}$ , светофорных

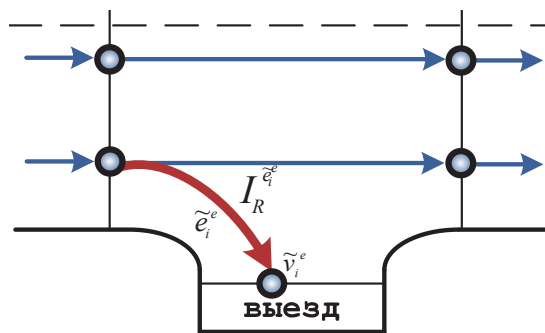


Рис. 6. Дуга-выезд

объектов  $\tilde{T}^S \subset \tilde{T}$  и линий горизонтальной и вертикальной дорожной разметки  $\tilde{T}^L \subset \tilde{T}$ , дополним подмножеством искусственных дорожных неровностей (ИДН)  $\tilde{T}^H \subset \tilde{T}$  и подмножеством пешеходных и дорожных ограждений  $\tilde{T}^F \subset \tilde{T}$ .

Класс «ТСОДД» является родовым классом для классов-потомков: «Дорожный\_знак», «Светофор», «Линия\_дорожной\_разметки», «Искусственная\_дорожная\_неровность», «Ограждение». Объект определен своим типом:  $type^{TX} \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ , где каждому типу поставлено в соответствие число: «Дорожный\_знак» – 1; «Светофор» – 2; «Линия\_дорожной\_разметки» – 3; «Искусственная\_дорожная\_неровность» – 4; «Ограждение» – 5.

Объекты класса «ТСОДД»  $\tilde{t}_i^X \in \tilde{T}$  определим атрибутами:

- тип ТСОДД  $type^{TX} \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ ;
- объект воздействия  $\tilde{S}^{TX} = \{\tilde{s}_1, \tilde{s}_2, \dots, \tilde{s}_n\}$ , где  $\tilde{s}_i \in \tilde{S}$ ;
- управляющие воздействия ТСОДД  $\tilde{t}_i^X$  на полосы движения ТрП  $Bands^{TX} = \{band_1, band_2, \dots, band_n\}$ , где каждый элемент множества – тетрада  $band_j = \langle \tilde{e}_i, lane_B^{TX}, lane_E^{TX}, Rule^{TX} \rangle$ ,  $\tilde{e}_i$  – дуга графа УДС с числом полос движения  $n^{\tilde{e}_i}$ ,  $lane_B^{TX} \in N = \{1, 2, \dots, n\}$  – начальная полоса действия ТСОДД,  $lane_E^{TX} \in N = \{1, 2, \dots, n\}$  – конечная полоса действия ТСОДД,  $Rule^{TX}$  – множество правил для ТСОДД  $\tilde{t}_i^X$ , описывающих управляющее воздействие.

Объекты класса «Дорожный\_знак»  $\tilde{t}_i^Z \in \tilde{T}^Z$  определим атрибутами, прямо или косвенно влияющими на ТрП:

- тип  $type^{TZ} \in N = \{1, 2, \dots, n\}$ , определенный ГОСТ [20];
- номинал  $value^{TZ} \in N = \{1, 2, \dots, n\}$  или  $value^Z \in \mathfrak{R}$ , где  $\mathfrak{R}$  – множество вещественных чисел;



- типоразмер  $size^{TZ} \in \{I, II, III, IV, \text{индивидуальный}\}$ ;

- признак наличия у знака флуоресцентной подложки желтого цвета  $if\_yellow^{TZ} \in \{\partial a, \text{нет}\}$ ;

- признак наличия светодиодов в конструкции знака  $if\_diode^{TZ} \in \{\partial a, \text{нет}\}$ ;

- состояние знака  $state^{TZ} \in \{\text{отличное, хорошее, плохое}\}$ ;

- координаты дислокации опоры дорожного знака  $\tilde{t}_i^Z \in Z^{1 \times 2}$  на карте  $coord^{TZ} \in Z^{1 \times 2}$ , где  $Z^{1 \times 2}$  – множество векторов размером 2.

Объекты класса «Светофор»  $\tilde{t}_i^S \in \tilde{T}^S$  определим атрибутами:

- тип  $type^{TS} \in N = \{1, 2, \dots, n\}$ , определенный ГОСТ [20];

- координаты дислокации  $\tilde{t}_i^S$  на электронной карте  $coord^{TZ} \in Z^{1 \times 2}$ , где  $Z^{1 \times 2}$  – множество векторов размером 2;

- длительность сигналов: красного  $t^R \in N = \{1, 2, \dots, n\}$ , зеленого  $t^G \in N = \{1, 2, \dots, n\}$ , желтого  $t^Y \in N_0 = \{0, 1, 2, \dots, n\}$ .

Длительность сигналов объектов класса «Светофор» может быть постоянной или меняющейся во времени (адаптивное управление).

Объекты класса «Линия дорожной разметки»  $\tilde{t}_i^L \in \tilde{T}^L$  определим атрибутами:

- тип  $type^{TL} \in N = \{1, 2, \dots, n\}$ , определенный ГОСТ [20];

- представление линии дорожной разметки на электронной карте  $polyline^T$ ;

- координаты дислокации  $\tilde{t}_i^L$  на электронной карте  $coord^{TL} \in Z^{2 \times k}$ , где  $Z^{2 \times k}$  – множество матриц размером  $2 \times k$ ;

- цвет линии разметки  $color^{TL} \in N = \{1, 2, \dots, 5\}$ , где 1 – белый, 2 – желтый, 3 – черный, 4 – оранжевый, 5 – другой;

- материал, используемый при нанесении разметки,  $material^{TL} \in \{\text{краска, термопластик, холодный-пластик}\}$ ;

- применяемый материал световозвращающий  $if\_reflective^{TL} \in \{\partial a, \text{нет}\}$ ;

- коэффициент световозвращения  $k\_brightness^{TL} \in N_0$ ;

- коэффициент световозвращения ночью посуху  $k\_reflection\_night\_dry^{TL} \in N_0$ ;

- коэффициент световозвращения ночью в дождь  $k\_reflection\_night\_wet^{TL} \in N_0$ ;

- коэффициент световозвращения днем  $k\_reflection\_day^{TL} \in N_0$ ;

- качество  $quality^{TL} \in [0, 100]$ , где 0 – линия разметки достигла максимального износа, 100 – разметка не подвергалась износу.

Объекты класса «Искусственная дорожная неровность»  $\tilde{t}_i^H \in \tilde{T}^H$  определим следующими атрибутами:

- тип  $type^{TH} \in N = \{1, 2, \dots, n\}$ , определенный ГОСТ [21].

- координаты дислокации  $\tilde{t}_i^H$  на электронной карте  $coord^{TH} \in Z^{2 \times k}$ , где  $Z^{2 \times k}$  – множество матриц размером  $2 \times k$ ;

- состояние ИДН  $state^{TH} \in \{\text{отличное, хорошее, плохое}\}$ ;

- ширина  $widht^{TH} \in \mathfrak{R}$ ;

- высота  $height^{TH} \in \mathfrak{R}$ .

Объекты класса «Ограждение»  $\tilde{t}_i^F \in \tilde{T}^F$  определим следующими атрибутами:

- тип по функциональному назначению  $type^{TF}$ , определенный ГОСТ [20];

- координаты дислокации  $\tilde{t}_i^F$  на электронной карте  $coord^{TF} \in Z^{2 \times k}$ , где  $Z^{2 \times k}$  – множество матриц размером  $2 \times k$ ;

- высота ограждающего устройства  $height^{TF} \in \mathfrak{R}$ .

## 2.4. Модель инцидентов

Множество инцидентов, оказывающих влияние на функционирование ТрИ, обозначим  $\tilde{Z} = \{\tilde{z}_i^X\}$ . Множество  $\tilde{Z}$  содержит следующие подмножества:

- $\tilde{Z}^P \subset \tilde{Z}$  – множество плановых инцидентов, имеющих регламентированное влияние на ТрИ (ремонт или реконструкция участка УДС, подземных и надземных коммуникаций и др.);

- $\tilde{Z}^A \subset \tilde{Z}$  – множество дорожно-транспортных происшествий;

- $\tilde{Z}^E \subset \tilde{Z}$  – множество чрезвычайных ситуаций.

Класс «Инцидент» является родовым классом для классов-потомков: «Плановый инцидент», «ДТП» и «Чрезвычайная ситуация». Объект определен своим типом:  $type^{ZX} \in \{1, 2, 3\}$ , где каждому типу поставлено в соответствие число: «Плановый инцидент» – 1; «ДТП» – 2, «Чрезвычайная ситуация» – 3.

Объекты класса «Инцидент»  $\tilde{z}_i^X \in \tilde{Z}$  определим следующими основными атрибутами, влияющими на функционирование ТрИ:

- тип  $type^{ZX} \in \{1, 2, 3\}$ ;

- координаты расположения инцидента  $\tilde{z}_i^X$

на электронной карте  $coord^{ZX} \in Z^{1 \times 2}$ , где  $Z^{1 \times 2}$  – множество векторов размером 2;

- зона действия (радиус влияния)  $r^{ZX} \in \mathfrak{R}$ , где  $\mathfrak{R}$  – множество вещественных чисел;
- мощность воздействия  $power^{ZX} \in \mathfrak{R}$ ;
- время начала действия  $time_B^{ZX} \in Time[HH : mm]$ ;
- время окончания действия  $time_E^{ZX} \in Time[HH : mm]$ ;
- дата начала действия  $date_B^{ZX} \in Date[YYYY : MM : DD]$ ;
- дата окончания действия  $date_E^{ZX} \in Date[YYYY : MM : DD]$ .

Совокупность этих атрибутов определяет основные имманентные свойства класса «Инцидент» и его наследников.

### 2.5. Модель придорожных объектов

Множество придорожных объектов, оказывающих влияние на значение мощности точки притяжения, обозначим  $\tilde{O} = \{\tilde{o}_i\}$ . Объекты класса «Придорожный\_объект»  $\tilde{o}_i \in \tilde{O}$  определим атрибутами:

- координаты дислокации придорожного объекта  $\tilde{o}_i$  на карте  $coord^O \in Z^{1 \times 2}$ , где  $Z^{1 \times 2}$  – множество векторов размером 2;
- зона действия (радиус влияния)  $r^O \in \mathfrak{R}$ , где  $\mathfrak{R}$  – множество вещественных чисел;
- мощность притяжения  $power^O \in \mathfrak{R}$ ;
- день недели, когда объект  $\tilde{o}_i$  воздействует на транспортный поток  $day^O \in \{1, 2, \dots, 7\}$ , где 1 соответствует понедельник, 7 – воскресенье;
- время начала действия объекта  $time_B^O \in Time[H : m]$ ;
- время окончания действия объекта  $time_E^O \in Time[H : m]$ ;
- дуги  $\tilde{E}^O = \{\tilde{e}_1, \tilde{e}_2, \dots, \tilde{e}_n\}$ ,  $\tilde{e}_i \in \tilde{E}$  графа УДС, на которые распространяет своё действие придорожный объект  $\tilde{o}_i$ ;
- узлы  $\tilde{V}^O = \{\tilde{v}_1, \tilde{v}_2, \dots, \tilde{v}_n\}$ ,  $\tilde{v}_i \in \tilde{V}$  графа УДС, на которые распространяет своё действие придорожный объект  $\tilde{o}_i$ .

Совокупность этих атрибутов определяет основные имманентные свойства класса «Придорожный\_объект».

### 2.6. Модель окружающей среды

Множество классов объектов, характеризующих окружающую среду и оказывающих влияние на ТрП, обозначим  $\tilde{\Psi} = \{\tilde{\psi}_i\}$ .

Объекты класса «Окружающая среда»  $\tilde{\psi}_i \in \tilde{\Psi}$  определим следующими основными атрибутами, влияющими на ТрП:

- наличие гололёда, гололедицы, зимней скользкости  $if\_ice^\Psi \in \{\partial a, nem\}$ ;
- наличие метели  $if\_snowstorm^\Psi \in \{\partial a, nem\}$ ;
- скорость ветра  $wind\_v^\Psi \in \mathfrak{R}$ ;
- направление ветра  $wind\_d^\Psi \in \{1, 2, \dots, 8\}$ , где 1 – северный, 2 – северо-восточный, 3 – восточный, 4 – юго-восточный, 5 – южный, 6 – юго-западный, 7 – западный, 8 – северо-западный;
- наличие осадков  $if\_rain^\Psi \in \{\partial a, nem\}$ ;
- наличие снежных заносов  $if\_snowbanks^\Psi \in \{\partial a, nem\}$ ;
- температура воздуха  $t\_air^\Psi \in Z$ , где  $Z$  – множество целых чисел;
- температура покрытия дороги  $t\_road^\Psi \in Z$ ;
- наличие тумана  $if\_fog^\Psi \in \{\partial a, nem\}$ ;
- комплексный показатель естественного и искусственного освещения – средняя горизонтальная освещенность  $light^\Psi \in N_0$ , лк;
- дуги  $\tilde{E}^\Psi = \{\tilde{e}_1, \tilde{e}_2, \dots, \tilde{e}_n\}$ ,  $\tilde{e}_i \in \tilde{E}$  графа УДС, на которые распространяют своё действие погодные условия  $\tilde{\psi}_i$ .

Окружающая среда  $\tilde{\Psi}$  оказывает наибольшее неблагоприятное влияние на ТрП в зимний период, характеризующийся снижением продолжительности светового дня, низкими температурами воздуха  $t\_air^\Psi \in [-50, +2]^\circ C$  и дорожного покрытия  $t\_road^\Psi \in [-50, 0]^\circ C$ . Зимняя скользкость  $if\_ice^\Psi = \partial a$ , снежные заносы  $if\_snowbanks^\Psi = \partial a$ , осадки  $if\_rain^\Psi = \partial a$ , туманы  $if\_fog^\Psi = \partial a$ , метели  $if\_snowstorm^\Psi = \partial a$ , боковой ветер  $wind\_v^\Psi > 5 \text{ м/с}$  приводят к снижению скорости  $v^{\tilde{e}_i}$  ТрП, снижению пропускной способности  $I_C^{\tilde{e}_i}$ .

## 3. РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

### 3.2. Имитационное моделирование

Разработаны программные модули для интеллектуальной транспортной системы ITSGIS [22], реализующие предложенные модели объектов, процессов и явлений ТрИ. Пространственное расположение указывается с помощью модуля [23]. В среде ITSGIS проведено имитационное моделирование, использующее гетеро-

генные источники информации при идентификации моделей.

На рис. 7 приведены результаты моделирования в ITSGIS по среднесуточным годовым данным за 2017 год г.о. Самара. Выделение участков УДС характеризуется значением интенсивности ТрП. Цветом указана мощность интенсивности на участке УДС. Цветовая схема позволяет выявлять точки притяжения ТрП путем нахождения экстремумов на карте интенсивности: зеленый – низкая интенсивность, красный – высокая интенсивность.

В целях повышения пропускной способности на участках УДС с затруднениями в движении ТрП возможны изменения характеристик участка, дуги или узла УДС:

- увеличение количества полос движения;
- канализирование ТрП во времени и пространстве;
- исключение перестроений и поворотов налево;
- факторизация ТрП.

### 3.2. Аналитическое моделирование

С использованием предложенных моделей проведено аналитическое моделирование на основе гидродинамического подхода к описанию транспортного потока.

На рис. 8 показано влияние планового инцидента на пропускную способность участка УДС. Снижение пропускной способности обусловле-



Рис. 7. Результаты моделирования в ITSGIS

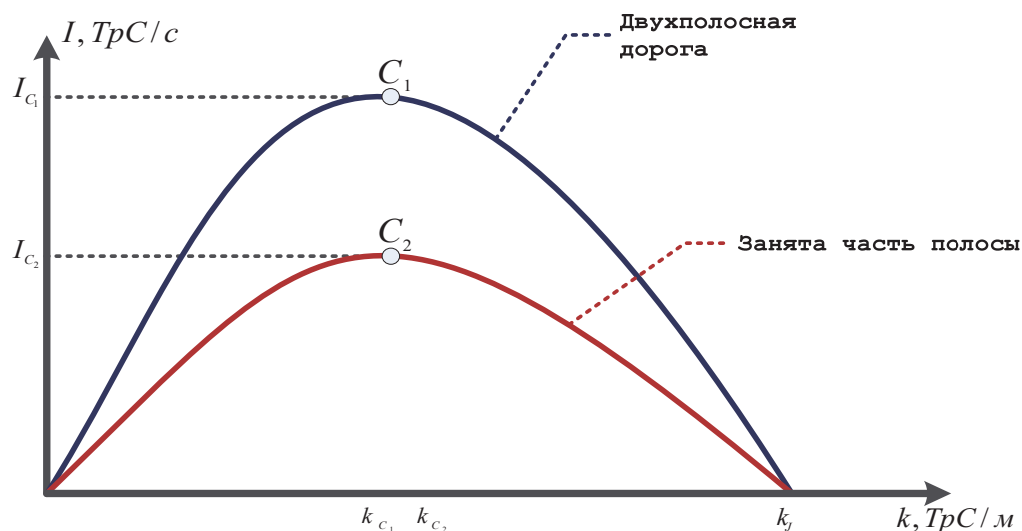


Рис. 8. Влияние инцидента на характеристики ТрП

но изменением геометрических характеристик участка УДС и нарушениями ритмичности движения ТрС.

На рис. 9 изображено влияние придорожных объектов на интенсивность ТрП. График 1 иллюстрирует изменение интенсивности в течение дня на магистрали, соединяющий места деловой активности населения с местами проживания. В этом случае выделяется два пика интенсивности – в момент прибытия населения в зону деловой активности (утренний час-пик) и в момент отбытия в жилые зоны (вечерний час-пик). График 2 иллюстрирует изменение интенсивности ТрП в зоне действия крупного торгово-развлекательного центра. В этом случае пик интенсивности приходится на вечернее время. График 3 иллюстрирует изменение интенсивности ТрП в зоне аэропорта. Пики интенсивности зависят от расписания взлетов/посадок воздушных судов.

На рис. 10 показано влияние благоприятных и неблагоприятных погодных условий на

пропускную способность участка УДС. Сильное влияние на пропускную способность оказывает расстояние видимости и геометрические параметры участка УДС.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение синтезированных моделей объектов, процессов и явлений транспортной инфраструктуры в передовых технических системах управления дорожным движением – АСУДД и ИТС – позволит организовать эффективное управление ТрП с канализированием во времени и пространстве, оценить изменение скорости, плотности, интенсивности ТрП, рассчитать транспортные задержки, выявить образование очередей и заторовых ситуаций, возникающих под воздействием различных дорожных, организационных и погодных факторов.

С точки зрения приложения разработанных моделей предлагается их использование для

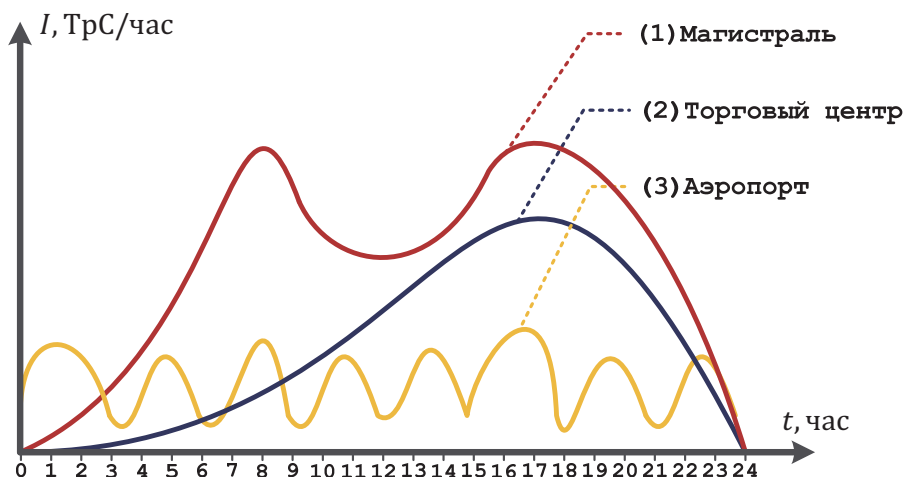


Рис. 9. Зависимость интенсивности ТрП от придорожных объектов

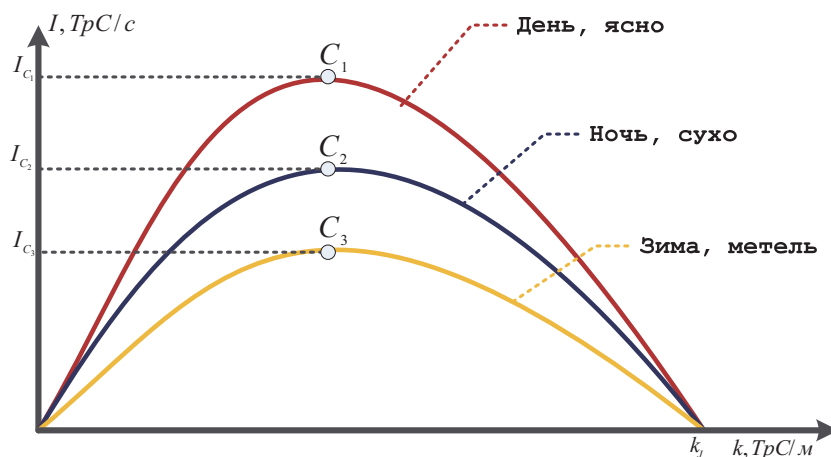


Рис. 10. Влияние погодных условий на характеристики ТрП



повышения оперативности доступа к гетерогенным информационным средам в условиях получения и обработки оперативной информации в ИТС и АСУДД при оптимизации управления транспортными процессами для снижения транспортных задержек на перекрестках, уменьшения очередей транспортных средств, повышения скорости движения, и, как следствие, улучшения экологической обстановки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жанказиев С.В. Интеллектуальные транспортные системы. М.: МАДИ, 2016. 120 с.
2. Омарова З.К., Минатуллаев Ш.М., Кашманов Р.Я. Повышение эффективности и качества обслуживания пассажиров на основе использования интеллектуальных транспортных систем // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2016. № 5. С. 35–39.
3. Corchero C., Sanmarti M. Vehicle-to-Everything (V2X): Benefits and Barriers // 2018 15th International Conference on the European Energy Market (EEM). IEEE, 2018. P. 1–4.
4. Енокаев В.К. Методика многокритериальной оценки вариантов интеграции локальных АСУДД // Мир транспорта. 2018. Т. 16. № 3. С. 26–34.
5. Терентьев В.В. Внедрение интеллектуальных систем на автомобильном транспорте // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 1(21). С. 117–122.
6. Журин А.В. Современное состояние вопроса автоматизации управления потоками в транспортных сетях // Проблемы исследования систем и средств автомобильного транспорта: труды конф. Тула: Тульский государственный университет, 2017. С. 371–378.
7. Грибова В.В., Шамрай Н.Б., Федорищев Л.А. Моделирование транспортных потоков в развивающейся городской инфраструктуре с использованием инструментального комплекса для создания интерактивных виртуальных сред // Автоматика и телемеханика. 2017. № 2. С. 50–64.
8. Андреев К.П., Терентьев В.В. Информационное моделирование в проектировании транспортных сетей городов // Новая наука: Теоретический и практический взгляд. 2016. № 117-2. С. 108–110.
9. Никитченко А.В., Николаев С.Б. Моделирование транспортных процессов // Современные инновации. 2017. № 1. С. 26–28.
10. Абрамова Л.С., Капинус С.В. Системный анализ систем управления дорожным движением // Молодий вчений. 2016. № 7. С. 177–181.
11. Девятков В.В. Опыт системного анализа транспортных систем с использованием метода имитационного моделирования // Вестник НЦБЖД. 2017. № 1. С. 18–28.
12. Головнин О.К., Михеева Т.И. Моделирование атрибутивно-ориентированной сетевидной системы управления транспортным процессом города // Информационные технологии и нанотехнологии: сборник трудов конф. Самара: Новая техника, 2018. С. 1942–1951.
13. Михеева Т.И. Структурно-параметрический синтез интеллектуальных транспортных систем. Самара: Самар. науч. центр РАН, 2008. 380 с.
14. Головнин О.К., Гуськов Р.С. Подсчет интенсивности транспортных и пешеходных потоков на перекрестке // ИТ & Транспорт : сб. науч. статей. Самара: Интелтранс, 2016. Т. 5. С. 55–62.
15. Пугачев И.Н., Маркелов Г.Я., Тормозов В.С. Методика подсчета транспортных средств с использованием космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения // Вестник ТОГУ. 2017. Т. 45. № 2. С. 13–20.
16. Зырянов В.В., Сорокин-Урманов С.Е. Особенности мониторинга дорожного движения // Строительство и архитектура: материалы конф. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2017. С. 236–240.
17. Краснов Е.С., Семенов С.С., Михайлов Н.Ю. Достоверность информации об интенсивности движения и надежность решения инженерных задач // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. 2017. № 3. С. 72–84.
18. Куржанский А.Б., Куржанский А.А., Варайя П. Роль макро моделирования в активном управлении транспортной сетью // Труды МФТИ. 2010. Т. 2, № 4. С. 100–118.
19. Формализация задачи геомаршрутизации на основе расширенной графовой модели / Т.И. Михеева, С.В. Михеев, О.К. Головнин, А.В. Золотовицкий // Современные проблемы безопасности жизнедеятельности: интеллектуальные транспортные системы и ситуационные центры: материалы междунар. конф. Казань: Центр инновационных технологий, 2018. Ч. I. С. 289–298.
20. ГОСТ Р 52289-2004. Технические средства организации дорожного движения. Правила применения дорожных знаков, разметки, светофоров, дорожных ограждений и направляющих устройств. М.: Стандартинформ, 2006. 94 с.
21. ГОСТ Р 52605-2006. Технические средства организации дорожного движения. Искусственные не-

- ровности. Общие технические требования. Правила применения. М.: Стандартинформ, 2007. 11 с.
22. Интеллектуальная транспортная геоинформационная система ITSGIS. Ядро. Самара: НПЦ ИТС, 2016. Т. 1. 171 с.
23. Михеева Т.И., Головнин О.К. Структурно-параметрический синтез геоинформационной системы зонального управления транспортными процессами на основе паттернов // Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений: сборник трудов конф. Т. 1. Уфа: УГАТУ, 2017. С. 90–95.

## SYSTEM ANALYSIS AND MODELING OF OBJECTS, PROCESSES AND PHENOMENA OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE IN ROAD TRAFFIC CONTROL SYSTEMS

© 2018 O.K. Golovnin

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

Modern traffic control systems implementation increases traffic flow safety and sustainability. It is important to develop models of transport infrastructure that have the ability to integrate with traffic control systems and allow to take into account the control effects of traffic facilities and environmental effects on traffic flows, their mutual influence on each other, which leads to the need to be considered as semantic (attribute) and spatial characteristics. Thus, the purpose of the work is to simulate objects, processes and phenomena of the transport infrastructure taking into account the spatial and attribute components based on the system analysis methods. The decomposition of the subject area was carried out. Transport infrastructure model is represented by the following sub-models: transport process models, road network, traffic control technical facilities, incidents, roadside objects, and environment. Simulation modeling via ITSGIS using heterogeneous sources of information in identifying models was carried out. Using the proposed models, analytical modeling was carried out based on the hydrodynamic approach to traffic flow simulation: the effect of planned incidents and weather conditions on the road network capacity, the effect of roadside objects on the traffic flow intensity. The use of proposed models of objects, processes and phenomena of transport infrastructure in traffic control systems will allow organizing effective traffic flow control, estimating the change in speed, density, intensity of traffic flows, calculating traffic delays, identifying the formation of queues and congestion caused by various road, organizational and weather factors.

*Keywords:* traffic control, transport infrastructure analysis, traffic flow model.