

УДК 004.9

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ УПРАВЛЕНИЯ ЗАГРУЗКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЙ

© 2018 А.А. Осьмушин<sup>1</sup>, Т.И. Михеева<sup>1,2</sup>, С.В. Михеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,

<sup>2</sup>Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 12.12.2018

В статье с позиции системного анализа исследованы существующие методы структурно-параметрического синтеза, математического моделирования, оптимального управления транспортными сетями, определены цели обеспечения безопасности функционирования транспортной инфраструктуры с позициями оптимальной загрузки транспортной сети, особенно, при возникновении нештатных ситуаций, определены требования к разработке математической модели загрузки транспортной сети. Большое количество исследований загрузки транспортной сети проводилось в среде интеллектуальной транспортной геоинформационной системы «ITSGIS» и было направлено на разработку алгоритмов автоматического детектирования нештатных ситуаций и заторов. При этом в интеллектуальной транспортной геоинформационной системе для сбора характеристик транспортных потоков использовались различные типы аппаратных средств: датчики, камеры, радары. При решении задачи проведения системного анализа управления загрузкой транспортной сети при возникновении нештатных ситуаций и построения модели нештатных ситуаций выполнена декомпозиция предметной области «Загрузка транспортной сети» на классы объектов, разработана модель предметной области; разработаны модели объектов транспортной инфраструктуры, входящих в предметную область, выявлены атрибутивные характеристики объектов; выполнена параметризация модели нештатной ситуации, представлена классификация нештатных ситуаций по типам, выявлены временные характеристики и геозоны непосредственного влияния на транспортную сеть и опосредованного влияния на транспортные потоки. Модель нештатной ситуации определяется классами: Тип, Время, Геозона\_влияния. Тип нештатной ситуации характеризуется её местоположением, т.е. её координатами на электронной карте, либо причиной возникновения. Время нештатной ситуации рассматривается с различных позиций, таких как время возникновения, нормативное и фактическое время устранения. Геозоны влияния нештатной ситуации делятся на зоны непосредственного и опосредованного влияния нештатной ситуации на транспортные процессы и объекты транспортной инфраструктуры. На основе построенных моделей разработаны методы управления загрузкой транспортной сети и анализа возникших нештатных ситуаций, включающие в себя сбор и обработку исходных данных, детерминацию нештатных ситуаций и их характеристик, выбор оптимальной стратегии реагирования, выполнение функций управления.

**Ключевые слова:** системный анализ, матмодель, загрузка транспортной сети, нештатная ситуация, управление транспортными процессами, точечные, линейные, полигональные геоинформационные зоны, геопозиция

Рассматривая существующие методы структурно-параметрического синтеза, математического моделирования, оптимального управления транспортными сетями [1, 2, 3, 4] и цели обеспечения безопасности функционирования транспортной инфраструктуры с позициями оптимальной загрузки транспортной сети, особенно, при возникновении нештатных ситуаций (НС) [5, 6], необходимо при разработке математической модели загрузки транспортной сети (ТрС) учесть следующие требования:

- модель должна быть сложноорганизованной: должны учитываться семантические и геоинформационные параметры транспортных потоков, транспортных процессов, нештатных ситуаций, как функций времени и геолокации транспортной сети [7, 8];

- модель должна описывать движение транспортных средств по ориентированному графу в рамках интерактивной карты в среде геоинформационной системы [9];

- модель, в полной мере учитывающая факторы взаимного влияния участников транспортных процессов, должна быть моделью, основанной на поиске равновесного распределения транспортных средств [10];

- модель должна иметь прогнозный характер [4];

- модель, определяющая загрузку транспорт-

---

*Осьмушин Алексей Александрович, аспирант.*

*Михеева Татьяна Ивановна, доктор технических наук, профессор кафедры организации и управления перевозками на транспорте. E-mail: mikheevati@its-spc.ru*

*Михеев Сергей Владиславович, кандидат технических наук, доцент кафедры организации и управления перевозками на транспорте.*

ной сети на основе расчета стратегий поведения участников транспортных процессов, должна быть моделью оптимальных стратегий [11].

### МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ЗАГРУЗКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ

Анализ загрузки ТрС является многокомпонентной задачей, решение которой требует построения математических моделей управления транспортными процессами (модель загрузки транспортной сети): модель транспортной сети, модель транспортного потока (ТрП), модель технических средств управления транспортной инфраструктурой, модель нештатной ситуации.

Для построения модели управления загрузкой транспортной сети введем следующие определения базовых понятий:

- Базовый участок – участок-перегон транспортной сети с непрерывным движением транспортного потока, не имеющий прилегающих участков въезда и выезда.

- Скорость свободного потока – средняя скорость движения транспортного потока на базовом участке без светофорного регулирования в условиях низкой плотности потока.

- Пропускная способность участка транспортной сети – максимальная интенсивность потока, которая достижима на базовом участке в текущих дорожных условиях; выражается отношением количества транспортных средств в приведённых единицах, движущихся по участку, к интервалу времени.

- Ёмкость участка транспортной сети – максимальная плотность потока, которая достижима на базовом участке; выражается отношением количества транспортных средств в приведённых единицах, движущихся по участку, к длине участка.

- Загрузка транспортной сети – количество транспортных средств, движущихся по участкам транспортной сети: перекрёсткам, перегонам, тоннелям, путепроводам.

Дескрипторами загрузки транспортной сети являются коэффициенты загрузки участка транспортной сети по интенсивности и плотности транспортного потока:

- Коэффициент загрузки участка транспортной сети по интенсивности транспортного потока определим, как отношение интенсивности к пропускной способности участка.

- Коэффициент загрузки участка транспортной сети по плотности транспортного потока определим, как отношение плотности к ёмкости участка.

- Перегруженный участок транспортной сети – участок, на котором коэффициент загрузки по плотности транспортного потока приближается к единице.

Модель загрузки транспортной сети – совокупность объектов, атрибутов и связей между ними, необходимых для решения задач:

- мониторинг и детектирование нештатных ситуаций, возникающих на транспортной сети;
- определение параметров транспортных потоков;

- управление транспортными процессами с позиций информационного, оперативного и инфраструктурного обеспечения с целью повышения эффективности и безопасности функционирования транспортной инфраструктуры;

- сбор и обработка статистических данных.

Фундаментальной особенностью анализа и построения модели загрузки транспортной сети, характеризующей сложность модели, является выявление взаимного влияния и итеративной зависимости выбора маршрутов движения транспортных средств от построения маршрутов другими транспортными средствами и возникающей в этой связи транспортной задержки. Математическая модель взаимного влияния строится на основе функции зависимости весовой характеристики (цены) дуги графа улично-дорожной сети от интенсивности транспортного потока на данной дуге [9, 12, 13].

Процесс формирования загрузки сети, состоящий из построения транспортных маршрутов, основан на сопоставлении весовых характеристик различных маршрутов. При этом весовые характеристики дуг графа улично-дорожной сети определяются существующей на текущий момент загрузкой транспортной сети [14].

Построение моделей сложных многокомпонентных систем базируется на применении методов и подходов системного анализа [11, 15, 16]. На начальном этапе решения поставленных задач производится декомпозиция предметной области управления загрузкой ТрС при возникновении нештатных ситуаций. Выявление входящих в неё сущностей и структурирование характеризующих их данных и взаимосвязей является базисом системного анализа [16]. Результат декомпозиции предметной области «Загрузка транспортной сети» представлен на рисунке 1. В основе данной декомпозиции лежит модель предметной области «Организация дорожного движения», описанная в [17], в которую добавлены классы, необходимые для описания модели нештатных ситуаций ТрС, технических средств управления транспортной инфраструктурой, реализующих адаптивное управление и информационное обеспечение участников дорожного движения.

Модель предметной области (ПрО) «Загрузка транспортной сети» опишем как (1):

$$M_{SubjectArea} = \langle M_{RN}, M_{TFlow}, M_{TIM}, M_{ES} \rangle, \quad (1)$$

где  $M_{SubjectArea}$  – модель предметной области «Загрузка ТрС»;

$M_{RN}$  – модель транспортной сети;  
 $M_{TFlow}$  – модель транспортного потока;  
 $M_{TIM}$  – модель технических средств управления транспортной инфраструктурой;  
 $M_{ES}$  – модель нештатной ситуации.

Модель транспортной сети  $M_{RN}$  определяется классами: *Участок, Граф\_ТрС*. Участок представляет собой полигональный элемент электронной карты геоинформационной системы, позволяющий синтезировать транспортную сеть любой конфигурации, структуры с различными характеристиками. Варианты движения транспортных средств, направление движения и различные параметры ТрП на участке ТрС описываются с помощью графа и весовых характеристик его элементов.

Модель транспортного потока  $M_{TFlow}$  определяется классами: *Скорость, Интенсивность, Плотность, Состав* [17]. Модель  $M_{TFlow}$  рассматривается с позиций микромоделей, в которой каждое транспортное средство выделено в отдельную модель с персонифицированными характеристиками, и макромоделей, в которой определены групповые макрохарактеристики ТрП.

Модель технических средств управления транспортной инфраструктурой  $M_{TIM}$  определяется классами *Светофорный объект, Дорожный знак, Дорожная разметка, Дорожное ограждение, Средство мониторинга состояния объектов ТрИ, Средство информирования участников движения*.

Модель  $M_{TIM}$  включает в себя стандартные технические средства организации дорожного движения, такие как дорожные знаки, светофоры и

разметка. Процесс мониторинга состояния объектов ТрИ включает в себя сбор и обработку данных о транспортных процессах и объектах с помощью технических средств, таких как датчики движения, камеры наблюдения, спутниковые системы навигации и т.д. Информирование участников движения осуществляется с помощью специализированных табло, средств передачи информации через различные каналы связи.

Модель нештатной ситуации  $M_{ES}$  определяется классами: *Тип, Время, Геозона\_влияния*. Тип нештатной ситуации характеризуется её местоположением, т.е. её координатами на электронной карте, либо причиной возникновения НС. Время нештатной ситуации рассматривается с различных позиций, таких как время возникновения НС, нормативное и фактическое время устранения НС и т.д. Геозоны влияния нештатной ситуации делятся на зоны непосредственного и опосредованного влияния НС на транспортные процессы и объекты ТрИ [18].

### МОДЕЛЬ НЕШТАТНОЙ СИТУАЦИИ

Дорожно-транспортную ситуацию  $S_j$  определим как событие или особое состояние транспортной сети, информация о возникновении которых получена соответствующими службами. Наиболее распространёнными событиями являются дорожно-транспортное происшествие, отключение устройств управления транспортными потоками, повреждение подземных коммуникаций с выбросом на проезжую часть и т.д. К особым состояниям отнесём чрезвычай-



Рис. 1. Декомпозиция предметной области «Загрузка транспортной сети»

ные природные явления, такие как туман, гололёд, ливень, метель, штормовые явления и др. К снижению пропускной способности дороги приводят дефекты дорожного покрытия, плановые или аварийные работы, ведущиеся на проезжей части.

Суть подхода к рассмотрению ситуации заключается в изучении дорожно-транспортной ситуации и отнесении её к классу нештатных ситуаций в случае, если событие обладает признаками влияния на транспортные потоки или пропускную способность транспортной сети. Элементом рассмотрения ситуации является подтверждение достоверности информации о событии или особом состоянии транспортной сети. Если информация достоверна, производится определение параметров ситуации (атрибутов соответствующих объектов), её анализ и обработка статистических данных.

Обозначим  $S = \{s_j\}$  как множество дорожно-транспортных ситуаций, о которых поступила информация.

Множество нештатных (критических) ситуаций на транспортной сети  $B = \{b_i\}$  – совокупность таких ситуаций, которые оказывают влияние на транспортные потоки, и возникновение которых могут носить случайный или плановый характер. Нештатные ситуации характеризуются тем, что они не учитываются при разработке постоянной схемы организации дорожного движения [18].

Любая нештатная ситуация  $b_i$  является дорожно-транспортной ситуацией  $s_j$ , при этом не каждая дорожно-транспортная ситуация  $s_j$  является нештатной ситуацией  $b_i$ .

$$\forall b_i \in B \mid \exists s_j \in S, b_i = s_j, \quad (2)$$

$$\forall s_j \in S \mid (\exists b_i \in B, s_j = b_i) \vee (!\exists b_i \in B, s_j = b_i). \quad (3)$$

*Определение.* Нештатное изменение графа ТрС – изменение атрибутивных параметров дуг, узлов или участков ТрС, вызванное нештатной ситуацией.

*Вид нештатной ситуации*  $w_i \in W$ . Множество  $W$  представляет собой набор всех возможных видов нештатных ситуаций. Примерами входящих в него элементов являются ДТП, туман, упавшее дерево, ремонтные работы, открытый канализационный люк и пр.

Модель нештатной ситуации определим как (4):

$$M_{ES} = \langle M_{Type}, M_{Time}, M_{Zone} \rangle, \quad (4)$$

где  $M_{ES}$  – модель нештатной ситуации;

$M_{Type}$  – модель типа нештатной ситуации;

$M_{Time}$  – модель временных характеристик нештатной ситуации;

$M_{Zone}$  – модель геозоны влияния нештатной ситуации.

## ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ МОДЕЛИ НЕШТАТНОЙ СИТУАЦИИ

Модель типа нештатной ситуации  $M_{Type}$  включает в себя типы нештатных ситуаций по местоположению и по источнику возникновения. На рисунке 2 приведена классификация типов нештатных ситуаций.

Местоположение – геопозиция нештатной ситуации на карте определена перечнем возможных типов нештатных ситуаций по пространственному расположению и позицией наблюдения нештатной ситуации.

Тип геопозиции нештатной ситуации  $type^{\Psi}$ : точечная, линейная, полигональная:

$$type^{\Psi} \in T^{\Psi} = \{ 'точечная', 'линейная', 'полигональная' \}. \quad (5)$$

Позицией наблюдения  $P_{b_i}$  нештатной ситуации  $b_i$  является источник информации о нештатной ситуации. В случае, если источником является техническое средство мониторинга транспортных процессов, расположенное на ТрС, производится привязка к его координатам  $(x_i, y_i)$ .

*Определение.* Множество нештатных ситуаций  $\Psi = \{\psi_i^X\}$ , визуализированных на карте, где каждый элемент  $\psi_i^X \in \Psi$  связан с соответствующим элементом  $b_i \in B$ .

Множество  $\Psi$  содержит в себе следующие подмножества:

$\Psi^D \subset \Psi$  – множество нештатных ситуаций точечного вида;

$\Psi^L \subset \Psi$  – множество нештатных ситуаций линейного вида;

$\Psi^A \subset \Psi$  – множество нештатных ситуаций полигонального вида.

*Определение.* Нештатную ситуацию назовем точечной, если её геометрические размеры пренебрежительно малы. Будем считать нештатную ситуацию точечной, если радиус окружности  $r$ , описывающей участок проезжей части, затронутый нештатной ситуацией, не превышает  $\varepsilon$ .

Точечная нештатная ситуация определена типом расположения на участках ТрС:

$$type^{\Psi^D} \in T^{\Psi^D} = \{ 'перегон', 'стандартный перекрёсток', 'путепровод', 'перекрёсток с круговым движением', 'железнодорожный переезд', 'тоннель' \},$$

т.е. тип точечной НС:  $type^{\Psi^D} \in T^{\Psi^D} = \{1, 2, \dots, n\}$ ;

где каждому типу соответствует число: «перегон» – 1, «стандартный перекрёсток» – 2, «путепровод» – 3, «перекрёсток с круговым движением» – 4, «железнодорожный переезд» – 5, «тоннель» – 6.

Множество дислоцированных точечных нештатных ситуаций определим как:  $\Psi^D = \{\psi_i^D\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ . Класс точечных нештатных ситуаций порождает подклассы в зависимости от дислокации не-

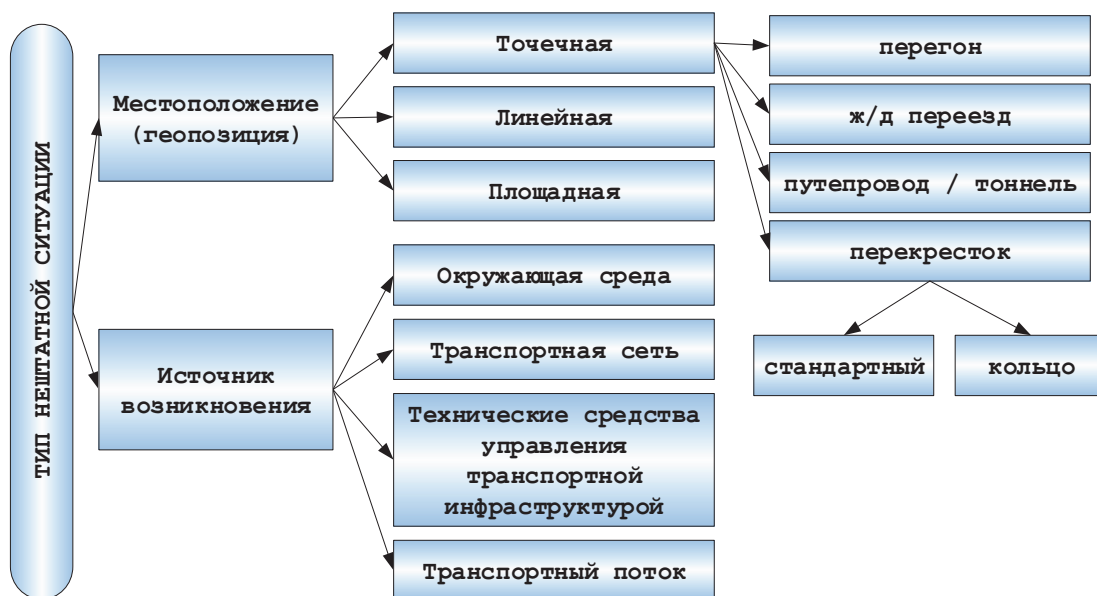


Рис. 2. Классификация типов нештатных ситуаций

штатной ситуации на разных участках ТрС:  $\Psi^D = \Psi^{D_1} \cup \Psi^{D_2} \cup \Psi^{D_3} \cup \Psi^{D_4} \cup \Psi^{D_5} \cup \Psi^{D_6}$ .

Точечная нештатная ситуация на перегоне  $\psi_i^{D_1} \in \Psi^D$  (рисунок 3) характеризуется координатами  $(x_i, y_i)$  и снижает пропускную способность дуги или противоположно направленных дуг графа ТрС, относящихся к одному перегону.

Точечная нештатная ситуация на стандартном перекрестке  $\psi_i^{D_2} \in \Psi^D$  (рисунок 4) характеризуется координатами  $(x_i, y_i)$  и снижает пропускную способность  $I^C$  для  $n$  направлений движения ТрС на перекрестке ТрС.

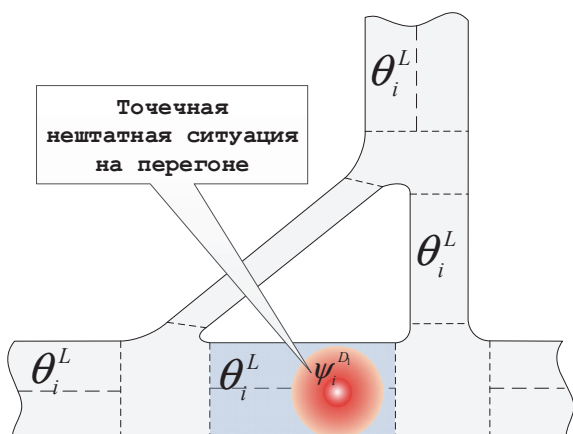


Рис. 3. Точечная нештатная ситуация на перегоне

Точечная нештатная ситуация на перекрестке с круговым движением  $\psi_i^{D_3} \in \Psi^D$  (рисунок 5) в зависимости от расположения представляется либо точечной нештатной ситуацией на перегоне, либо точечной нештатной ситуацией на стандартном перекрестке.

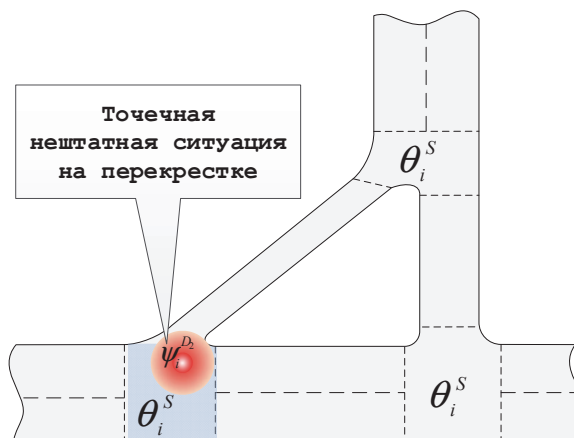


Рис. 4. Точечная нештатная ситуация на перекрестке

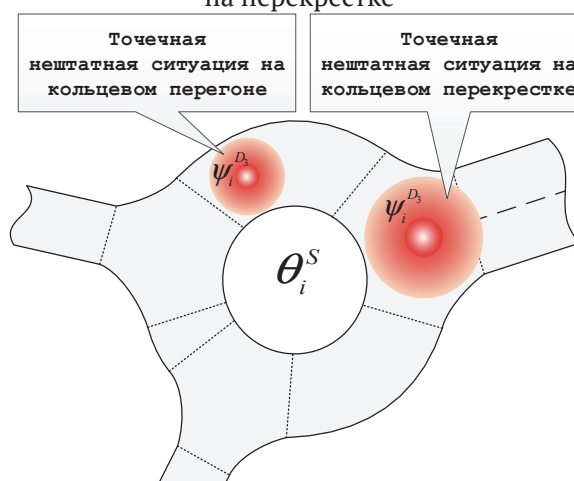


Рис. 5. Варианты нештатных ситуаций на перекрестке с круговым движением

Точечная нештатная ситуация на железнодорожном переезде  $\psi_i^{D_4} \in \Psi^D$ , на мосту, путепроводе  $\psi_i^{D_5} \in \Psi^D$  или в тоннеле  $\psi_i^{D_6} \in \Psi^D$

определяется также, как точечная ситуация на перегоне.

**Определение.** Нештатную ситуацию назовем *линейной*, если она непосредственно воздействует на один или несколько смежных участков ТрС, при этом отсутствуют точки разделения и слияния транспортных потоков на этих участках. Множество дислоцированных линейных нештатных ситуаций определим как:  $\Psi^L = \{\psi_i^L\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ . Линейная нештатная ситуация отличается от точечной значительной протяжённостью (рисунок 6), характеризуется географическими координатами граничных точек  $(x_{1i}, y_{1i})$ ,  $(x_{2i}, y_{2i})$ . Опционально указываются координаты эпицентра линейной нештатной ситуации  $(x_{ei}, y_{ei})$ .

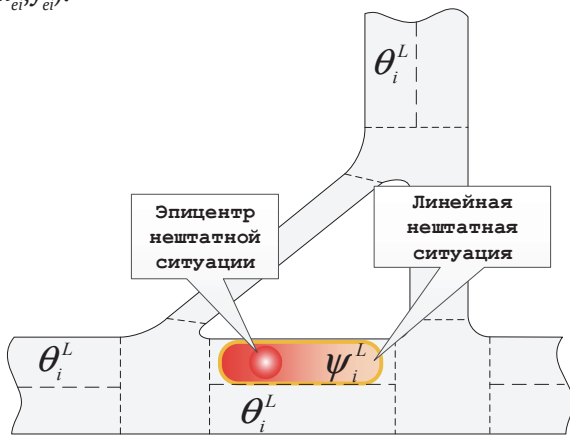


Рис. 6. Линейная нештатная ситуация

**Определение.** Нештатную ситуацию назовем *полигональной*, если она оказывает воздействие на  $n$  смежных или несмежных участков ТрС, вне зависимости от наличия точек разветвления и слияния транспортных потоков (рисунок 7). Множество дислоцированных полигональных нештатных ситуаций определим как:  $\Psi^A = \{\psi_i^A\}$ ,  $\Psi^D = \{\psi_i^D\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ . Для указания дислокации полигональной нештатной ситуации используются координаты вершин полигона  $(x_{1i}, y_{1i})$ ,  $(x_{2i}, y_{2i}), \dots, (x_{ni}, y_{ni})$ . Вариантом указания дислокации является привязка к графу ТрС с помощью указания зоны непосредственного воздействия. Опционально указываются координаты эпицентра линейной нештатной ситуации  $(x_{ei}, y_{ei})$ .

Тип источника возникновения нештатной ситуации *type<sup>B</sup>*: *окружающая среда, транспортная сеть, технические средства управления транспортной инфраструктурой, транспортный поток*:

$$type^B \in T^B = \{ 'окружающая\_среда', 'транспортная\_сеть', 'технические\_средства\_управления\_транспортной\_инфраструктурой', 'транспортный\_поток' \}, \quad (6)$$

Множество  $B$  нештатных ситуаций разделим на следующие подмножества  $B^X$  [18, 19]:

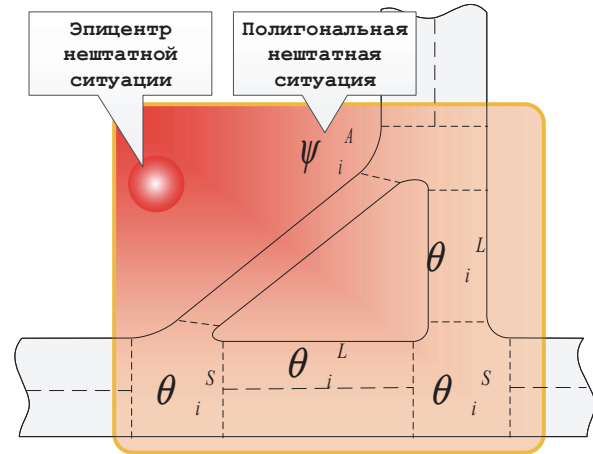


Рис. 7. Полигональная нештатная ситуация

$B^E \subset B$  – множество нештатных ситуаций, вызванных окружающей средой;

$B^N \subset B$  – множество нештатных ситуаций, вызванных изменениями транспортной сети;

$B^S \subset B$  – множество нештатных ситуаций, вызванных техническими средствами управления транспортной инфраструктурой;

$B^F \subset B$  – множество нештатных ситуаций, вызванных транспортным потоком.

**Определение.** Нештатная ситуация  $b_i^E \in B^E$  вызвана *окружающей средой*, если её возникновение обусловлено чрезвычайными природными явлениями (туман, гололёд и т.п.)

**Определение.** Нештатная ситуация  $b_i^N \in B^N$  вызвана *изменениями транспортной сети*, если причиной её возникновения является разрушение дорожного покрытия, посторонний объект на проезжей части (например, упавшее на проезжую часть дерево), ремонтные и строительные работы, затрагивающие проезжую часть.

**Определение.** Нештатная ситуация  $b_i^S \in B^S$  вызвана *техническими средствами управления транспортной инфраструктурой*, если её возникновение обусловлено неработающим светофором, нечитаемым дорожным знаком.

**Определение.** Нештатная ситуация  $b_i^F \in B^F$  вызвана *транспортным потоком*, если её возникновение обусловлено дорожно-транспортным происшествием.

### МОДЕЛЬ ВРЕМЕННЫХ АТТРИБУТОВ НЕШТАТНОЙ СИТУАЦИИ

Динамическая нештатная ситуация – событие, привязанное ко времени. Модель  $M_{Time}$  определена следующими параметрами (аттрибутами):

$t_D$  – время поступления информации о нештатной ситуации;

$t_A$  – время возникновения нештатной ситуации, определяется для каждого экземпляра

класса «Нештатная ситуация» во время его создания, если данное время известно;

$t_N$  – нормативное время устранения нештатной ситуации, показывает максимально допустимый период времени, отведённый на устранение нештатной ситуации нормативными документами;

$t_R$  – время фактического устранения нештатной ситуации, определяется для каждого экземпляра класса «Нештатная ситуация» в момент устранения нештатной ситуации;

$t_P^s$  – запланированное время возникновения нештатной ситуации, определяется для каждого экземпляра класса «Нештатная ситуация» в случае, если НС заранее запланирована;

$t_P^f$  – запланированное время устранения нештатной ситуации, определяется для каждого экземпляра класса «Нештатная ситуация» в случае, если НС заранее запланирована;

$t_P^e$  – ожидаемое время устранения нештатной ситуации, определяется в момент возникновения нештатной ситуации путём обработки статистических данных о НС, устраненных ранее.

Нештатная ситуация  $b_i^X \in B$  может находиться в одном из следующих состояний:

$b_i^I \in B$  – получена информация, требующая проверки;

$b_i^C \in B$  – активна;

$b_i^M \in B$  – в процессе устранения;

$b_i^R \in B$  – устранена;

$b_i^P \in B$  – запланирована;

$b_i^B \in B$  – запланированная нештатная ситуация произошла раньше времени;

$b_i^H \in B$  – возникновение запланированной нештатной ситуации отложено;

$b_i^T \in B$  – запланированный срок устранения нештатной ситуации истёк, нештатная ситуация не устранена;

$b_i^U \in B$  – нормативный срок устранения нештатной ситуации истёк, нештатная ситуация не устранена;

$b_i^Q \in B$  – устранена раньше запланированного срока;

$b_i^W \in B$  – возникновение запланированной нештатной ситуации отменено.

### МОДЕЛЬ ГЕОЗОНЫ ВЛИЯНИЯ

Каждой нештатной ситуации  $b_i$  необходимо сопоставить изменения, вносимые ею на ТрС. Данные изменения определяются моделью геозоны влияния  $M_{Zone}$ , определяемой как:

$$M_{Zone} = \langle Z_1, Z_2 \rangle,$$

где  $Z_1$  – зона непосредственного влияния;

$Z_2$  – зона опосредованного влияния.

**Определение.** Зона непосредственного влияния  $Z_1$  нештатной ситуации  $b_i$  – совокупность дуг  $\tilde{e}_j \in \tilde{E}$  графа ТрС  $G$ , на которые нештатная ситуация оказывает влияние в виде изменения таких характеристик, как скорость свободного движения  $v_0^{\tilde{e}_j}$ , пропускная способность  $I_C^{\tilde{e}_j}$ , количество полос движения  $n^{\tilde{e}_j}$ . Зона непосредственного влияния  $Z_1$  определяет дислокацию нештатной ситуации на транспортной сети, она статична на протяжении всего времени существования нештатной ситуации.

Модель зоны непосредственного влияния нештатной ситуации определим формулой:

$$Z_1 = \{(\tilde{e}_i, E_i^B \{E_{ij}^L\}, E_i^{SO})\}, i = 1, m, j = 1, n_{\tilde{e}_i}^B, (7)$$

где  $m$  – количество дуг графа ТрС  $G$ , на которые нештатная ситуация оказывает воздействие;  $n_{\tilde{e}_i}^B$  – количество полос движения на участке, соответствующем  $i$ -й дуге, на которые нештатная ситуация оказывает воздействие,  $E_i^B$  – вектор параметров нештатной ситуации, независимых от полосы движения на  $i$ -й дуге,  $E_{ij}^L$  – вектор параметров нештатной ситуации, актуальных для  $j$ -й полосы  $i$ -й дуги,  $E_i^{SO}$  – вектор параметров, характеризующих возможность объезда нештатной ситуации по обочине и полосам встречного движения.

Коэффициент изменения пропускной способности  $k_{I_C}^{\tilde{e}_i}$  показывает изменение пропускной способности дуги  $\tilde{e}_i$  при возникновении нештатной ситуации.

$$k_{I_C}^{\tilde{e}_i} = \frac{I_C^{\tilde{e}_i} - I_C^{B\tilde{e}_i}}{I_C^{\tilde{e}_i}} (8)$$

где  $I_C^{\tilde{e}_i}$  – номинальная пропускная способность дуги  $\tilde{e}_i$ ;

$I_C^{B\tilde{e}_i}$  – пропускная способность дуги в условиях нештатной ситуации на ней.

Аналогично определяется коэффициент  $k_{I_{Cj}}^{\tilde{e}_i}$  изменения пропускной способности  $j$ -й полосы дуги  $\tilde{e}_i$ . В случае отсутствия воздействия НС на  $j$ -ю полосу  $k_{I_{Cj}}^{\tilde{e}_i} = 1$ . Если  $j$ -я полоса перекрывается полностью, то  $k_{I_{Cj}}^{\tilde{e}_i} = 0$ .

**Определение.** Зона опосредованного влияния  $Z_2(t)$  нештатной ситуации  $b_i$  в момент времени  $t$  – совокупность дуг  $\tilde{e}_j \in \tilde{E}$  графа ТрС  $G$ , на которых нештатная ситуация оказывает влияние на характеристики транспортных потоков.

Зона опосредованного влияния нештатного изменения на ТрП динамична – она меняется в зависимости от меняющихся с течением времени характеристик ТрП.

Зона опосредованного влияния зависит от характеристик нештатной ситуации, структуры графа ТрС и весовых характеристик его дуг.

Распространение влияния нештатной ситуации на микроуровне осуществляется из-за форми-

рования очереди транспортных средств в случае превышения транспортного спроса над пропускной способностью дуги при изначально свободном движении, либо из-за снижения скорости.

Зона  $Z_2(t)$  опционально делится на несколько подзон с разной степенью влияния на транспортные потоки:  $Z_2(t) = Z_2^1(t) \cup Z_2^2(t) \cup \dots \cup Z_2^m(t)$ , где  $m$  – количество подзон.

Большое количество исследований загрузки ТрС в среде интеллектуальной транспортной геоинформационной системы «ITSGIS» направлено на разработку алгоритмов автоматического детектирования нештатных ситуаций и заторов [20]. ITSGIS для сбора характеристик транспортных потоков рассматривает использование следующих типов аппаратных средств: индукционные петли, магнитометры, активные и пассивные инфракрасные датчики, пассивные акустические и ультразвуковые датчики, камеры, частотно-модулированные радары с непрерывным излучением и доплеровские радары, импульсные лазерные излучатели. Измеренные значения почасовой интенсивности транспортных потоков на одном и том же участке транспортной сети в разные будние дни при штатном функционировании транспортной сети образуют массив данных, из которых путём нахождения средних или медианных значений интенсивности формируется паттерн штатных почасовых интенсивностей. Значительное отклонение измеряемой в режиме реального времени интенсивности от найденного паттерна означает вероятность присутствия нештатной ситуации. Аналогичные паттерны генерируются для скорости и плотности транспортных потоков. В случае невозможности непосредственного измерения характеристик транспортных потоков используются методы прогнозирования.

Подводя итоги решения задачи проведения системного анализа управления загрузкой транспортной сети при возникновении нештатных ситуаций и построения модели нештатных ситуаций, сделаем следующие выводы:

- выполнена декомпозиция предметной области «Загрузка транспортной сети» на классы объектов, разработана модель предметной области;
- разработаны модели объектов транспортной инфраструктуры, входящих в предметную область, выявлены атрибутивные характеристики объектов;
- выполнена параметризация модели нештатной ситуации, представлена классификация нештатных ситуаций по типам, выявлены временные характеристики и геозоны непосредственного влияния на транспортную сеть и опосредованного влияния на транспортные потоки.

На основе построенных моделей разработаны методы управления загрузкой транспортной сети и анализа возникших нештатных ситуаций,

включающие в себя сбор и обработку исходных данных, детерминацию нештатных ситуаций и их характеристик, выбор оптимальной стратегии реагирования, выполнение функций управления.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков, Д.О. Математическое моделирование загрузки транспортной сети для определения целесообразности строительства новых видов транспортных систем / Д.О. Волков, С.Н. Гаричев, Р.А. Горбачев, Н.Н. Мороз // Труды МФТИ, 2015. – Т. 7. № 3. – С. 69-76.
2. Сильянов, В.В. Моделирование критических ситуаций в транспортном потоке / В.В. Сильянов, А.В. Уткин, С.А. Елисеева // Наука и техника в дорожной отрасли. – М.: Издательство Дороги, 2008. – № 3. – С. 6-8.
3. Крылатов, А.Ю. Управление транспортными потоками мегаполиса / А.Ю. Крылатов, В.В. Захаров // Сборник статей Седьмой Российско-Немецкой конференции по логистике и SCM DR-LOG 2012, 2012. – С. 305-310.
4. Михеев, С.В. Диагностика состояния транспортной инфраструктуры с использованием нейронных сетей [Электронный ресурс] / А.А. Осьмушин, А.В. Сидоров, С.В. Михеев // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – №6. – URL: [www.science-education.ru/113-11807](http://www.science-education.ru/113-11807) (дата обращения 14.10.2018).
5. Traffic incident management handbook / N. Owens, A. Armstrong, P. Sullivan, C. Mitchell. – U.S. Department of Transportation, 2010. – 116 p.
6. Гусарова, М.В. Метод кластерного анализа в задаче определения областей влияния инцидента на транспортный поток города / А.А. Осьмушин, Т.И. Михеева, О.Н. Сапрыкин, М.В. Гусарова // Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений (ITIDS'2016): труды IV Международной конференции – Уфа: УГАТУ. – 2016. – Т. 2. – С. 170-175.
7. Михеева Т.И. Инструментальная среда для проектирования объектов интеллектуальной транспортной системы // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Серия «Технические науки» №40. Самара: СамГТУ, 2006. С.96-103.
8. Михеева Т.И. Data Mining в геоинформационных технологиях // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Серия «Технические науки» №41. Самара: СамГТУ, 2006. С.96-99.
9. Золотовицкий, А.В. Применение теории графов в задачах управления дорожным движением / Т.И. Михеева, А.В. Золотовицкий // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. Сер. «Актуальные проблемы радиоэлектроники» - Самара: СГАУ, - 2003. С. 20 - 24.
10. Knoop, V.L. Individual Travelers' Advice: System Setup, Measures, and Expected Results [Электронный ресурс] / V.L. Knoop, W.J. Schakel, E. Jonkers, B. Van Arem // Proceedings of the 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 23-27 January 2011, Washington D.C. – 2011. – URL: [http://www.victorknoop.eu/research/papers/trb\\_ccc.pdf](http://www.victorknoop.eu/research/papers/trb_ccc.pdf) (дата обращения 14.10.2018).
11. Симанков, В.С. Системный анализ в адаптивном



- управлении / В.С. Симанков, Е.В. Луценко, В.Н. Лаптев. Под ред. В.С. Симанкова. – Краснодар: ИСТЭК КубГТУ, 2001. – 258 с.
12. Швецов, В.И. Математическое моделирование транспортных потоков / В.И. Швецов // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 11. – С. 3-46.
  13. Щербаков, А.Д. Технология построения графа улично-дорожной сети в геоинформационной системе / С.В. Михеев, О.К. Головнин, А.Д. Щербаков / Перспективные информационные технологии (ПИТ-2013) // Труды межд. научно-техн. конф. – Самара: Изд-во Самарск. науч. центра РАН, 2013. – С. 227-230.
  14. Федосеев, А.А. Особенности нештатных изменений улично-дорожной сети / А.А. Осьмушин, Д.А. Михайлов, О.В. Сапрыкина, А.А. Федосеев // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XVII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2012. – С. 210.
  15. Михеенков, И.Е. Программная таксономия – основа для создания гипермедийных обучающих систем / Т.И. Михеева, И.Е. Михеенков // Информационные технологии, 1998. №8. С. 40-43.
  16. Сурмин, Ю.П. Теория систем и системный анализ : учебное пособие / Ю.П. Сурмин. К. : МАУП, 2003. – 368 с.
  17. Михеева, Т.И. Структурно-параметрический синтез интеллектуальных транспортных систем / Т.И. Михеева. Самара: Самар. науч. центр РАН, 2008. 380 с.
  18. Осьмушин, А.А. Моделирование нештатных ситуаций на улично-дорожной сети [Электронный ресурс] / А.А. Осьмушин, И.Г. Богданова, А.В. Сидоров // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – №6. – URL: www.science-education.ru/113-11766 (дата обращения 14.10.2018).
  19. Сапрыкин, О.Н. Управление транспортной инфраструктурой / Т.И. Михеева, С.В. Михеев, О.Н. Сапрыкин // Самара: Интелтранс, 2015. – 173 с.
  20. Осьмушин, А.А. Обмен информацией V2I в геоинформационной транспортной системе в условиях критических ситуаций / А.А. Осьмушин, С.В. Михеев, О.К. Головнин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т.16, № 4(2). – С. 399-403.

## SYSTEM ANALYSIS FOR MANAGING TRANSPORT NETWORK IN CASE OF EMERGENCY SITUATIONS

© 2018 A.A. Osmushin<sup>1</sup>, T.I. Mikheeva<sup>1,2</sup>, S.V. Mikheev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

<sup>2</sup> Samara State Technical University

In the article from the position of the system analysis the existing methods of structural-parametric synthesis, mathematical modeling, optimal control of transport networks are investigated, the goals of ensuring the safety of the transport infrastructure with the positions of the optimal load of the transport network, especially in case of emergency situations, the requirements for the development of a mathematical model of the load of the transport network are determined. A large number of studies on the load of the transport network was carried out in the environment of intelligent transport geographic information system "ITSGIS" and was aimed at the development of algorithms for automatic detection of emergency situations and congestion. At the same time, various types of hardware such as sensors, cameras and radars were used in the intelligent transport geographic information system to collect the characteristics of traffic flows. When solving the problem of carrying out a system analysis of the load management of the transport network in the event of emergency situations and building a model of emergency situations, the decomposition of the subject area "Loading of the transport network" into classes of objects, the model of the subject area is developed; the models of transport infrastructure objects included in the subject area are developed, the attribute characteristics of objects are revealed; performed parameterization of the emergency situation, the classification of contingencies according to the types identified temporal characteristics and geofences direct impact on the transport network and the indirect impact on traffic flows. Model contingencies defined classes: Type, Time, Reasonably. The type of emergency situation is characterized by its location, i.e. its coordinates on the electronic map, or the cause. Time of emergency is considered from various positions, such as time of occurrence, normative and actual time of elimination. Geofences of influence of an emergency situation are divided into zones of direct and indirect influence of an emergency situation on transport processes and objects of transport infrastructure. On the basis of the constructed models developed methods of management of loading of the transport network and analysis of emergency situations, including the collection and processing of raw data, the determination of emergency situations and their characteristics, the choice of the optimal response strategy, the performance of management functions.

*Keywords:* system analysis, mathematical model, loading of transport network, emergency situation, management of transport processes, point, linear, polygonal geoinformation zones, geoposition.

*Aleksey Osmushin, Graduate Student.*

*Tatyana Mikheeva, Doctor of Technical Science, Professor of the Department of Transport Organization.*

*E-mail: mikheevati@its-spc.ru*

*Sergey Mikheev, Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department of Transport Organization.*