

УДК 519.715
ББК 35.41 + 32.813

ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫЙ ПОХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ДВИЖЕНИЯ НА СЛОЖНЫХ УЧАСТКАХ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ

Лапковский Р. Ю.¹, Иванов А. С.², Иващенко В. А.³

(Учреждение Российской академии наук

Институт проблем точной механики и управления РАН,
Саратов)

Предложен подход к моделированию движения на сложных участках дорожно-транспортной сети, основанный на причинно-следственных комплексах. Подход позволяет учитывать совместное влияние разнородных составляющих на дорожную ситуацию, включая человеческий фактор, играющий решающую роль при возникновении аварийных ситуаций. Рассмотрена модель участка автотранспортной системы, основанная на предлагаемом подходе. Приведена структура модели и детальное описание всех ее основных составляющих. Также рассмотрен пример моделирования движения на типичном регулируемом перекрестке.

Ключевые слова: автотранспортная система, дорожно-транспортная сеть, моделирование, причинно-следственные комплексы.

1. Введение

Глобальная автотранспортная система является сложной человеко-машинной системой, включающей большое количе-

¹ Роман Юрьевич Лапковский, аспирант (robotpub@gmail.com).

² Александр Сергеевич Иванов, кандидат физико-математических наук (ac_ivanov@info.sgu.ru).

³ Владимир Андреевич Иващенко, доктор технических наук, ученый секретарь (iptmuram@san.ru).

ство разнородных составляющих: дорожно-транспортных сетей (ДТС), транспортных средств (ТС), водителей, пешеходов, средств управления дорожным движением, дорожных условий (ДУ) и др., которые находятся в тесной взаимосвязи и оказывают существенное влияние друг на друга [3]. Это делает рассматриваемую систему достаточно сложным объектом для анализа.

В текущий момент общее число автомобилей в мире достигает одного миллиарда. По прогнозам экспертов к 2020 году это число достигнет двух миллиардов [10]. Поэтому актуальной задачей является повышение безопасности движения за счет правильно выбранных мероприятий по модернизации существующих и разработке новых участков ДТС, улучшению подготовки водителей, контролю ТС и др.

Решение этой задачи требует разработки моделей соответствующих участков автотранспортной системы, в полной мере учитывающей все важные требования, предъявляемые при поиске эффективных мероприятий. Указанные требования напрямую связаны с необходимостью учета особенностей и условий, при которых возникают аварийные ситуации.

При возникновении аварийных ситуаций ключевым звеном является человек – водитель транспортного средства, пешеход и др. Именно по вине человека происходит подавляющее число дорожно-транспортных происшествий [3, 5].

В то же время современные модели автотранспортных систем ориентированы в первую очередь на транспортные потоки, не уделяя достаточного внимания человеческой составляющей и сложной природе сложившихся дорожных условий [4, 6, 8, 9]. Это делает их полезными для задач анализа дорожной ситуации, когда человеческий фактор и особенности ситуации отходят на второй план. Для детального рассмотрения функционирования отдельных участков автотранспортной системы, человеческое звено и сложная природа дорожных условий являются существенными и определяющим образом влияют на исход ситуации [3].

Построение таких моделей требует применения подходов, которые позволят связать между собой большое количество разнородных компонентов исследуемой системы, таких как

транспортные средства, водители, дорожные сети, управляющие механизмы, пешеходы, погодные условия и др. Одним из них является причинно-следственный подход, предложенный А.Ф. Резчиковым и В.А. Твердохлебовым [2, 7].

В данной статье предлагается подход к моделированию движения на отдельных участках ДТС, учитывающий влияние разнородных составляющих на дорожную ситуацию и уделяющий особое внимание человеческому фактору.

2. Постановка задачи моделирования

В качестве исследуемой системы рассматривается часть автотранспортной системы, охватывающая один участок ДТС.

В каждый момент времени t система описывается состоянием $s(t) \in S$, где S – пространство возможных состояний. Вводится функция $s(t+T) = F(s(t), T)$, определяющая динамику системы, где $T \in R^+ \cup \{0\}$ – временной интервал функционирования системы.

Пусть $s(t_0)$ – начальное состояние системы, где t_0 – начальный момент времени. Необходимо найти конечное состояние системы $s(t_k)$, где $t_k \geq t_0$.

Конкретный вид функции F определяется комбинацией причинно-следственных звеньев (ПСЗ) (рис. 1), образующих причинно-следственный комплекс (ПСК).

Каждое ПСЗ реализует причинно-следственную связь между группой причины и порождаемой ей группой следствия. Группа причины содержит терминал α для активно формируемых причин и терминал β для причин, являющихся условиями реализации связи, а группа следствия – терминал ν для доминантного следствия и терминал η для изменившихся условий и побочных следствий.

Причины и следствия в терминалах представляются наборами элементарных причинно-следственных элементов. Каждый элемент представляет структуру, состоящую из набора пар (параметр, значение), характеризующих в совокупности сущность причины и следствия.

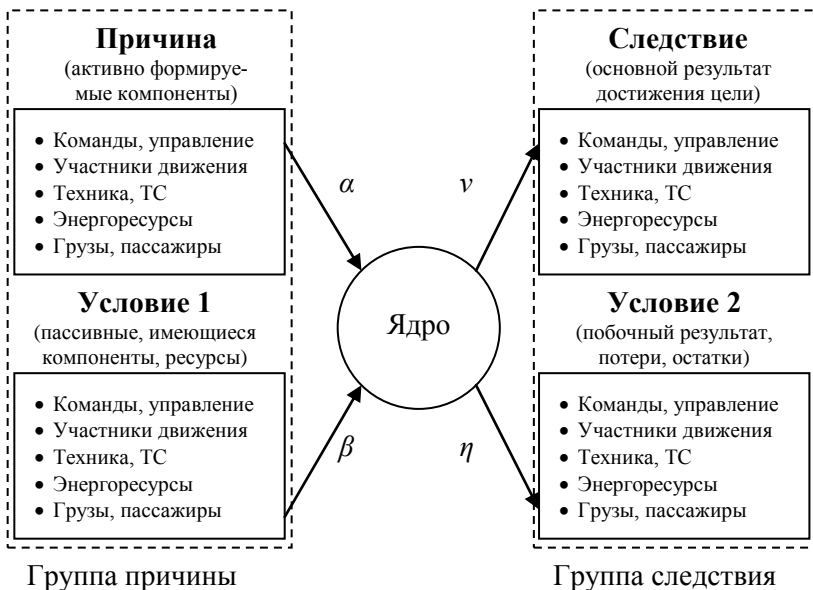


Рис. 1. Структура причинно-следственного звена

Связи задают порядок перемещения причинно-следственных элементов между звеньями, тем самым, определяя причинно-следственные связи между компонентами системы.

Функцию преобразования элементов группы причины в группу следствия выполняет ядро ПСЗ. Происходит преобразование в тот момент, когда в терминалах группы причины сформирован необходимый для формирования следствия состав причинно-следственных элементов. На формализацию ядер ПСЗ ограничений не накладывается, что позволяет использовать для их реализации разнообразные методы и модели.

3. Модель участка дорожно-транспортной сети

3.1. СТРУКТУРА МОДЕЛИ

Декомпозируем рассматриваемую систему на ряд более простых составляющих: дорожные условия, светофоры, транс-

портные средства и водители. Все они функционируют автономно и одновременно, обладают собственными законами поведения, однако тесно связаны между собой и оказывают взаимное влияние друг на друга.

При моделировании исследуемой системы применяется принцип особых состояний [1]. Процесс моделирования системы разбивается по времени на ряд этапов. На каждом из них описываются автономное функционирование каждой из составляющих системы. Между этапами реализуется взаимовлияние составляющих друг на друга. Моменты взаимовлияния являются особыми состояниями, определяющими длительности этапов моделирования [2].

Таким образом, каждый этап характеризуется парой состояний системы: состояние перед его реализацией $s(t_i)$ и состояние после реализации $s(t_{i+1})$. Моделирование осуществляется поэтапно с помощью функции F , которая задается набором причинно-следственных звеньев, моделирующих систему на каждом этапе.

Причинно-следственный комплекс оперирует набором элементарных причин и следствий, которые определяют значимые для данной модели параметры объектов. Поэтому перед тем как рассматривать структуру модели, укажем все используемые в ней классы элементарных причинно-следственных элементов:

o_0 – «команда управления моделированием»: m – «режим», t – «время»;

o_1 – «состояние водителя»: t – «время, оставшееся до реакции водителя на дорожные условия», r – «набор точек маршрута движения», n – «номер»;

o_2 – «характеристики водителя»: t – «время реакции», r – «радиус зоны обзора», e – «минимальное расстояние, при котором водителем применяется экстренное торможение», n – «номер»;

o_3 – «видимые дорожные условия»: c – «набор видимых транспортных средств с указанием основных параметров движения», t – «набор видимых светофоров с указанием их состояний»;

o_4 – «команда водителю транспортного средства»: a – «положение акселератора», b – «положение педали тормоза», d – «направление движения», n – «номер»;

o_5 – «состояние ТС»: a – «текущее положение акселератора», b – «текущее положение педали тормоза», d – «направление движения», a_n – «новая положение акселератора», b_n – «новое положение педали тормоза», a_t – «время, оставшееся до срабатывания акселератора», b_t – «время, оставшееся до срабатывания тормозной системы», n – «номер»;

o_6 – «характеристики ТС»: a_t – «задержка срабатывания акселератора», b_t – «задержка срабатывания тормозной системы», a_k – «коэффициент, определяющий максимальные значения скорости и ускорения ТС», b_k – «коэффициент, определяющий эффективность торможения ТС», v_{max} – «максимальная скорость», n – «номер»;

o_7 – «влияние ТС на ДУ»: a – «ускорение», v_{max} – «максимальная скорость», d – «направление движения»;

o_8 – «состояние светофора»: s – «состояние», t – «время, оставшееся до смены состояния», n – «номер»;

o_9 – «характеристики светофора»: t_k – «время нахождения в состоянии красный», t_j – «время нахождения в состоянии желтый», t_3 – «время нахождения в состоянии зеленый», p – «положение светофора», z – «зона действия», n – «номер»;

o_{10} – «влияние светофора на ДУ»: s – «состояние», p – «положение светофора», z – «зона действия», n – «номер»;

o_{11} – «дорожные условия»: c – «автомобили», t – «светофоры», f – «коэффициент, определяющий уровень видимости и зависящий от наличия дыма, тумана, дождя», s – «коэффициент скольжения дорожного покрытия, зависящий от типа покрытия, наличия льда, снега или воды»;

o_{12} – «характеристики моделирования»: T – «требуемое время моделирования»; o_{13} – «команда завершения этапа»: f – «флаг завершения моделирования».

Моделирование перекрестка с применением принципа особых состояний описывается причинно-следственным комплексом, являющимся композицией ряда ПСЗ (рис. 2).

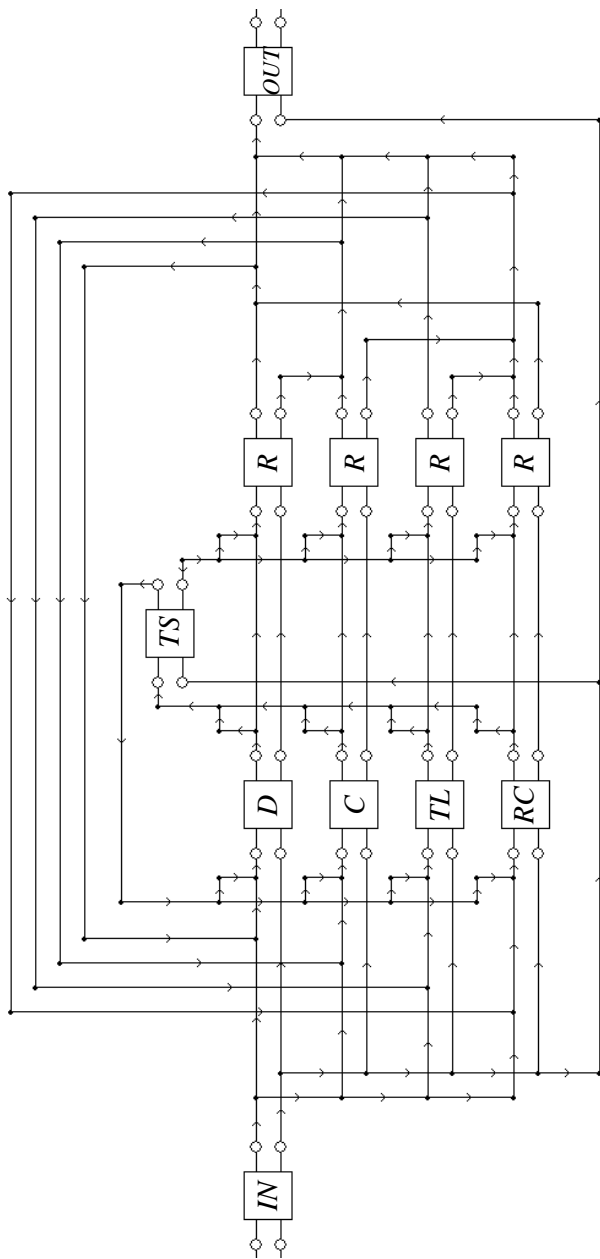


Рис. 2. Структура причинно-следственного комплекса

3.2. МОДЕЛИРУЮЩИЕ ЗВЕНЬЯ

Причинно-следственный комплекс содержит ряд моделирующих ПСЗ, описывающих отдельные компоненты системы: D – поведение водителей автомобилей; C – функционирование транспортных средств; TL – работу светофоров; RC – характеристики дорожных условий.

Структура комплекса и принцип синхронизации отдельных процессов требует от моделирующих звеньев определенного поведения, которое выражается в определенной реакции (выработке соответствующих элементов группы следствия) на поступление определенных элементов в группу причины. Поэтому ядра всех моделирующих звеньев строятся на базе, реализующей необходимое поведение и требующее от конкретных моделей реализации только двух функций:

– определения по заданному начальному состоянию процесса времени наступления особого состояния соответствующего типа – времени до ближайшей инициации взаимодействия с другим процессом ($f_{\text{врем.}}()$);

– осуществления по заданному начальному состоянию процесса его моделирования на заданном промежутке времени $T(f_{\text{мод.}}(T))$.

Функциональная база моделирующих звеньев.

Допустимые элементы терминалов звена:

$$\alpha = ((o_0, \dots), (\dots), (\dots), (\dots), (\dots), (\dots));$$

$$\beta = ((\dots), (\dots), (\dots), (\dots), (\dots), (\dots));$$

$$\eta = ((o_0, \dots), (\dots), (\dots), (\dots), (\dots), (\dots));$$

$$\nu = ((\dots), (\dots), (\dots), (\dots), (\dots), (\dots)),$$

где «(...)» – допущение любых элементов в терминале.

Блок-схема алгоритма ядра представлена на рис. 3.

Рассмотрим реализацию указанных функций в каждом из моделирующих звеньев.

Звено D описывает поведение водителей автомобилей в зависимости от окружающих их условий. Таким образом, группа причины включает в себя информацию о текущем состоянии водителей, их личных данных и дорожных условиях. Группу следствия образуют изменившееся состояние водителей и их команды органам управления транспортными средствами. Далее

представлен механизм реализации причинно-следственной связи для одного водителя. При большем их количестве причинно-следственные зависимости устанавливаются для каждого из них в отдельности.

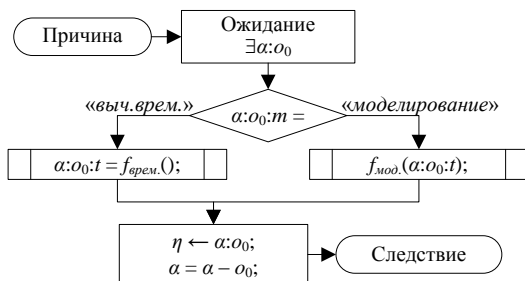


Рис. 3. Блок-схема алгоритма ядра базового звена

Допустимые элементы терминалов звена:

$\alpha = (\emptyset, (o_1), \emptyset, \emptyset, \emptyset, (o_3))$; $\beta = (\emptyset, (o_2), \emptyset, \emptyset, \emptyset, \emptyset)$;

$\eta = (\emptyset, (o_1), \emptyset, \emptyset, \emptyset, \emptyset)$; $\nu = ((o_4), \emptyset, \emptyset, \emptyset, \emptyset, \emptyset)$.

Реализация функции $f_{\text{врем.}}$:

$f_{\text{врем.}} = \min(\alpha:o_1:t, f(\alpha:o_1, \alpha:o_3))$, где f – функция вычисления времени, через которое транспортное средство достигнет очередной точки маршрута при сохранении параметров движения неизменными.

Функция $f_{\text{мод.}}(T)$ представлена блок-схемой на рис. 4.

Звено С описывает поведение ТС в зависимости от их характеристик и команд водителей. Группа причины включает в себя информацию о текущем состоянии ТС, их характеристиках и о командах водителей. Группу следствия образуют изменившиеся состояния ТС и соответствующее влияние на дорожные условия. Далее представлен механизм реализации причинно-следственной связи для одного ТС. При большем их числе причинно-следственные зависимости устанавливаются для каждого из них в отдельности.

Допустимые элементы терминалов звена:

$\alpha = ((o_4), \emptyset, (o_5), \emptyset, \emptyset, \emptyset)$; $\beta = (\emptyset, \emptyset, (o_6), \emptyset, \emptyset, \emptyset)$;

$\eta = (\emptyset, \emptyset, (o_5), \emptyset, \emptyset, \emptyset)$; $\nu = ((o_7), \emptyset, \emptyset, \emptyset, \emptyset, \emptyset)$.

Реализация функции $f_{\text{врем.}}$:

$$f_{\text{врем.}} = \min(a:o_5:a_t, a:o_5:b_t).$$

Функция $f_{\text{мод.}}(T)$ представлена блок-схемой на рис. 5.

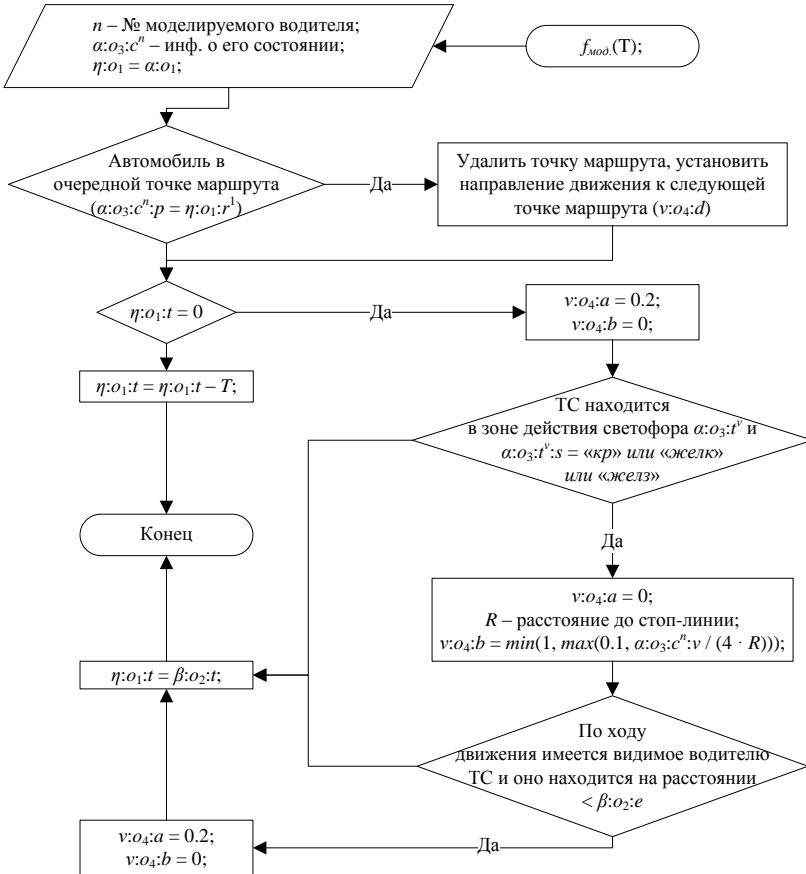


Рис. 4. Блок-схема функции моделирования поведения водителя

Звено TL описывает функционирование светофоров в зависимости от параметров их работы. Группа причины включает в себя информацию о текущем состоянии светофоров и их параметрах. Группу следствия образуют изменившееся состояние светофоров и соответствующее влияние на дорожные условия.

Далее представлен механизм реализации причинно-следственной связи для одного светофора. При большем их числе причинно-следственные зависимости устанавливаются для каждого из них в отдельности.

Допустимые элементы терминалов звена:

$$\alpha = (\emptyset, \emptyset, (o_8), \emptyset, \emptyset, \emptyset); \beta = (\emptyset, \emptyset, (o_9), \emptyset, \emptyset, \emptyset);$$

$$\eta = (\emptyset, \emptyset, (o_8), \emptyset, \emptyset, \emptyset); \nu = ((o_{10}), \emptyset, \emptyset, \emptyset, \emptyset, \emptyset).$$

Реализация функции $f_{\text{врем.}}$:

$$f_{\text{врем.}} = \alpha: o_8: t.$$

Функция $f_{\text{мод.}}(T)$ представлена блок-схемой на рис. 6.

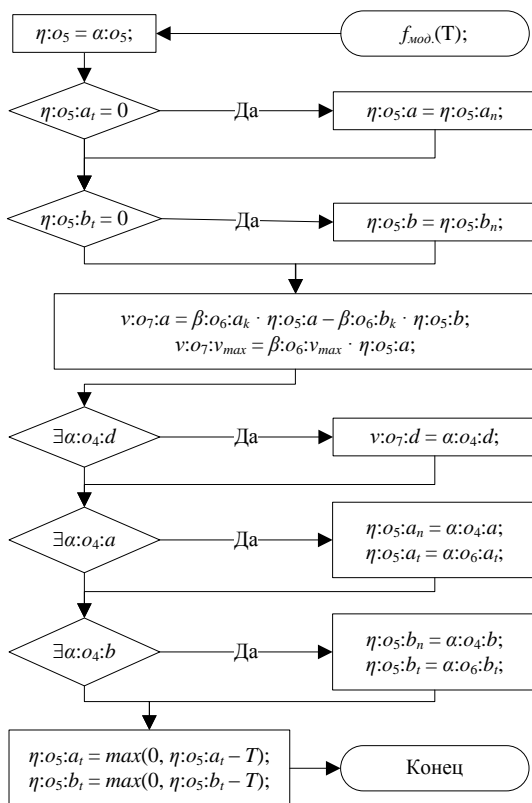


Рис. 5. Блок-схема функции моделирования поведения ТС

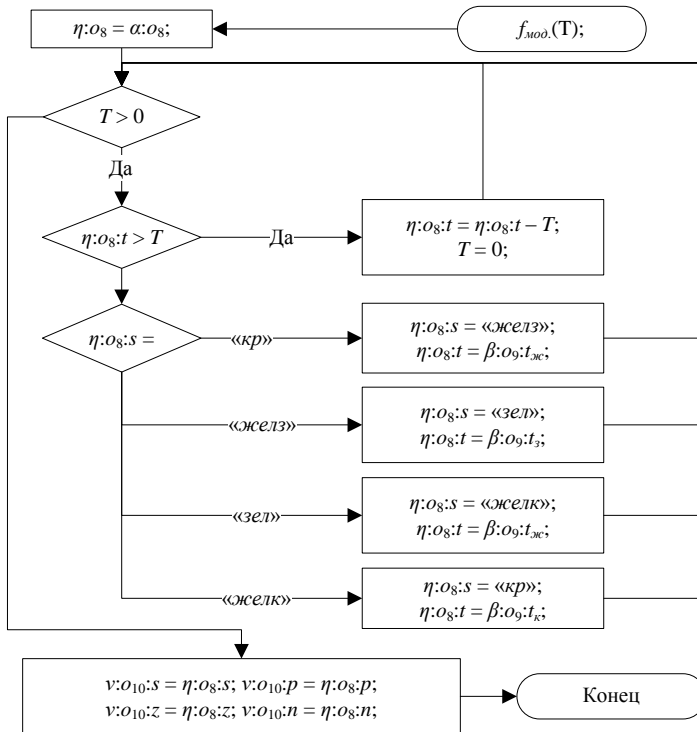


Рис. 6. Блок-схема функции моделирования поведения светофора

Звено *RC* описывает изменение дорожных условий под действием участников дорожного движения, регулирующих элементов и внешних воздействий. Группа причины включает в себя информацию о текущих дорожных условиях. Группу следствия образуют изменившиеся дорожные условия и доступная участникам движения информация.

Допустимые элементы терминалов звена:

$$\alpha = ((o_7^1, \dots, o_7^n, o_{10}^1, \dots, o_{10}^m), \emptyset, \emptyset, \emptyset, \emptyset, (o_{11}));$$

$$\beta = (\emptyset, \emptyset, \emptyset, \emptyset, \emptyset, \emptyset);$$

$$\eta = (\emptyset, \emptyset, \emptyset, \emptyset (o_{11})); \nu = ((o_3), \emptyset, \emptyset, \emptyset, \emptyset, \emptyset).$$

Реализация функции $f_{\text{врем.}}$:

$$f_{\text{врем.}} = \infty.$$

Функция $f_{\text{мод.}}(T)$ представлена блок-схемой на рис. 7.

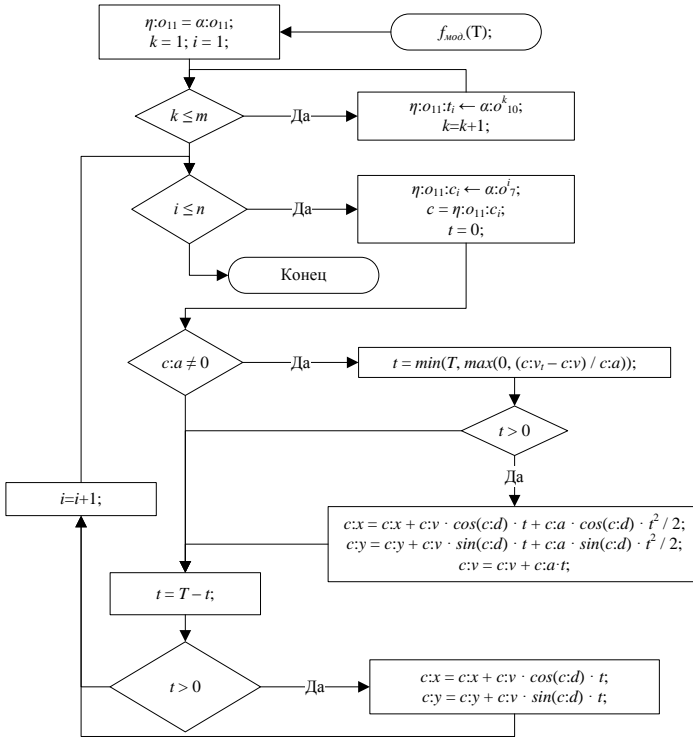


Рис. 7. Блок-схема функции изменения дорожных условий

Рассматриваемый уровень реализации ядер моделирующих ПСЗ является достаточно простым и поверхностным, но достаточным для рассмотрения особенностей подхода. При необходимости получения более точной и глубокой модели, ядра моделирующих звеньев могут быть усовершенствованы и дополнены до необходимого уровня подробности.

3.3. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ЗВЕНЬЯ

В структуре ПСК присутствует также ряд вспомогательных звеньев, которые реализуют принцип особых состояний и обеспечивают управление моделированием.

Звено IN выполняет функцию входного распределения поступивших элементов между выделенными составляющими системы и подает начальную команду моделирования.

Допустимые элементы терминалов звена:

$$\begin{aligned} \alpha &= ((o_4, o^1_7, \dots, o^n_7, o^1_{10}, \dots, o^m_{10}), (o_1), (o_5, o_8), \emptyset, \emptyset, (o_3)); \\ \beta &= ((o_{12}), (o_2), (o_6, o_9), \emptyset, \emptyset, \emptyset); \\ \eta &= ((o_0, o_4, o^1_7, \dots, o^n_7, o^1_{10}, \dots, o^m_{10}), (o_1), (o_5, o_8), \emptyset, \emptyset, (o_3)); \\ \nu &= ((o_{12}), (o_2), (o_6, o_9), \emptyset, \emptyset, \emptyset); \\ n & - \text{количество автомобилей}; \\ m & - \text{количество светофоров}. \end{aligned}$$

Условие срабатывания: $\beta: o_{12}: T > 0$.

Выполнение: $\eta \leftarrow \alpha; \nu \leftarrow \beta; \alpha = \emptyset; \beta = \emptyset;$

$\eta: o_0: t = \text{«выч.врем.»}$.

Звено OUT выполняет функцию выходного объединения элементов в единое целое по окончанию процесса моделирования.

Допустимые элементы терминалов звена:

$$\begin{aligned} \alpha &= ((o_{13}, o_4, o^1_7, \dots, o^n_7, o^1_{10}, \dots, o^m_{10}), (o_1), (o_5, o_8), \emptyset, \emptyset, (o_3)); \\ \beta &= ((o_{12}), (o_2), (o_6, o_9), \emptyset, \emptyset, \emptyset); \\ \eta &= ((o_4, o^1_7, \dots, o^n_7, o^1_{10}, \dots, o^m_{10}), (o_1), (o_5, o_8), \emptyset, \emptyset, (o_3)); \\ \nu &= ((o_{12}), (o_2), (o_6, o_9), \emptyset, \emptyset, \emptyset). \end{aligned}$$

Условие срабатывания: $\alpha: o_{13}: f = \text{«истина»}$.

Выполнение: $\eta \leftarrow \alpha - o_{13}; \nu \leftarrow \beta; \alpha = \emptyset; \beta = \emptyset$.

Звено TS является основным служебным звеном, обеспечивающим управление этапами моделирования, основанное на принципе особых состояний. В системе выделяется ряд типов особых состояний, число которых соответствует числу моделирующих звеньев. Таким образом, по команде звена TS на первом шаге каждое моделирующее звено определяет время до наступления особого состояния своего типа. Значения этих времен анализируются звеном TS и выбирается минимальное из них. На втором шаге моделирующим звеньям дается команда моделирования за выбранное время. Далее шаги повторяются до тех пор, пока моделирование не будет произведено до конца.

Допустимые элементы терминалов звена:

$$\alpha = ((o^1_0, \dots, o^k_0), \emptyset, \emptyset, \emptyset, \emptyset, \emptyset); \beta = ((o_{12}), \emptyset, \emptyset, \emptyset, \emptyset, \emptyset);$$

$$\eta = ((o_0), \emptyset, \emptyset, \emptyset, \emptyset, \emptyset); v = ((o_{13}), \emptyset, \emptyset, \emptyset, \emptyset, \emptyset).$$

Условие срабатывания: $\alpha:k =$ количество моделирующих

звеньев.

Блок-схема алгоритма выполнения представлена на рис. 8.

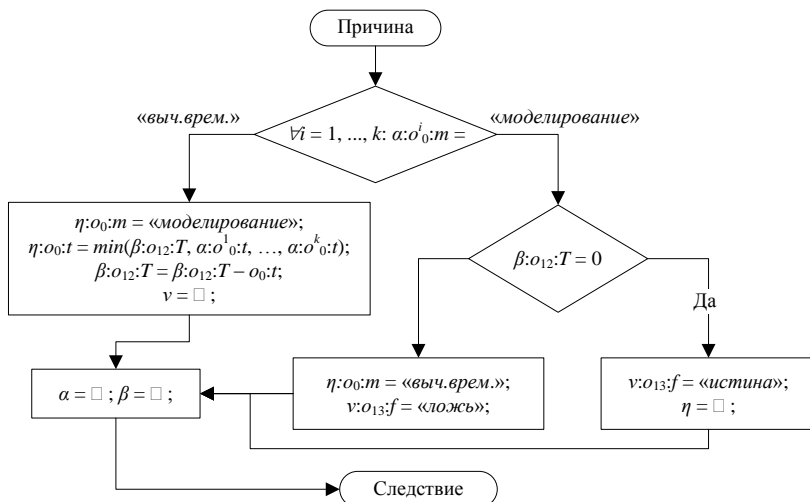


Рис. 8. Блок-схема функции изменения дорожных условий

Звено R накапливает поступающие элементы группы причины и по соответствующей команде звена *TS* передают их в группу следствия в неизменном виде.

Допустимые элементы терминалов звена:

$$\alpha = ((o_{13}, \dots), (\dots), (\dots), (\dots), (\dots), (\dots));$$

$$\beta = ((\dots), (\dots), (\dots), (\dots), (\dots), (\dots));$$

$$\eta = ((\dots), (\dots), (\dots), (\dots), (\dots), (\dots));$$

$$v = ((\dots), (\dots), (\dots), (\dots), (\dots), (\dots)).$$

Условие срабатывания: $\exists \alpha: o_{13}$.

Выполнение: $\eta \leftarrow \alpha - o_0; v \leftarrow \beta; \alpha = \emptyset; \beta = \emptyset$.

Рассмотренный подход эффективно применять для описания и анализа сложных участков дорожно-транспортной сети, которыми являются перекрестки и транспортные развязки. Подход позволяет детально описывать цепочки развития собы-

тий при анализе дорожных ситуаций с учетом всевозможных факторов, влияющих на нее.

4. Пример моделирования

Рассмотрим процесс функционирования ПСК, моделирующего движение на перекрестке. Ограничимся рассмотрением классического перекрестка, образованного пересечением двух дорог. Перекресток регулируется с помощью светофора, работающего в двух режимах, пропуская транспортный поток поочередно по двум направлениям.

На момент начала моделирования к перекрестку подъезжают два автомобиля (рис. 9). Интервал моделирования T примем равным 8,5 секундам, в течение которых автомобили должны успешно проехать перекресток, соблюдая правила дорожного движения.

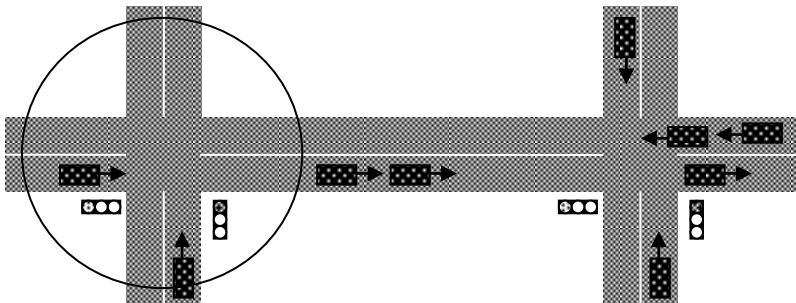


Рис. 9. Состояние перекрестка на начало моделирования

На первом этапе формируется группа причины. Для этого определяется наполнение терминалов α и β :

$$o_{12}: T = 8,5;$$

$$o_{1,1}: t = 0,3, r = ((1,5; -12), (1,5; 50)), n = 1;$$

$$o_{1,2}: t = 0,5, r = ((-10; -1,5), (50; -1,5)), n = 2;$$

$$o_{2,1}: t = 0,5, r = 30, e = 2, n = 1;$$

$$o_{2,2}: t = 0,7, r = 10, e = 3, n = 2;$$

$$o_3: c = ((p = (1,5; -12), v = 20, a = 0, d = \pi/2, n = 1), \\ (p = (-10; -1,5), v = 12, a = 0, d = 0, n = 2)),$$

- $t = ((s = \langle\text{кр}\rangle, p = (4; -4), z = (...), n = 1), (s = \langle\text{зел}\rangle,$
 $p = (-4; -4), z = (...), n = 2));$
 $o_{4,1}: n = 1;$
 $o_{4,2}: n = 2;$
 $o_{5,1}: a = 0, b = 0,3, d = \pi/2; a_n = 0; b_n = 0,7, a_t = 0,1, b_t = 0,1,$
 $n = 1;$
 $o_{5,2}: a = 0,2, b = 0, d = 0; a_n = 0,2; b_n = 0, a_t = 0,05, b_t = 0,05,$
 $n = 2;$
 $o_{6,1}: a_t = 2, b_t = 2, a_k = 10, b_k = 20, v_{max} = 120, n = 1;$
 $o_{6,2}: a_t = 3, b_t = 3, a_k = 5, b_k = 10, v_{max} = 80, n = 2;$
 $o_{7,1}: a = -14, v_{max} = 120, d = \pi/2;$
 $o_{7,2}: a = 1, v_{max} = 80, d = 0;$
 $o_{8,1}: s = \langle\text{кр}\rangle, t = 5, n = 1;$
 $o_{8,2}: s = \langle\text{зел}\rangle, t = 5, n = 1;$
 $o_{9,1}: t_k = 10, t_{ж} = 3, t_3 = 10, p = (4; -4), z = (...), n = 1;$
 $o_{9,2}: t_k = 10, t_{ж} = 3, t_3 = 10, p = (-4; -4), z = (...), n = 2;$
 $o_{10,1}: s = \langle\text{кр}\rangle, p = (4; -4), z = (...), n = 1;$
 $o_{10,2}: s = \langle\text{зел}\rangle, p = (-4; -4), z = (...), n = 2;$
 $o_{11}: c = ((p = (1,5; -12), v = 20, d = \pi/2, a = -6, n = 1),$
 $(p = (-10; -1,5)), v = 12, d = 0, a = 1, n = 2)),$
 $t = ((s = \langle\text{кр}\rangle, p = (4; -4), z = (...), n = 1),$
 $(s = \langle\text{зел}\rangle, p = (-4; -4), z = (...), n = 2)), f = 0,1, s = 0,3.$

Согласно структуре комплекса, наполнение его терминалов ведет к наполнению соответствующих терминалов группы причины звена *IV*. Вследствие этого срабатывает механизм ядра и выработанные им причинно-следственные элементы группы следствия, в соответствии со связями, поступают в другие ПСЗ. Также создается элемент $o_0:t = \langle\text{выч.врем.}\rangle$, который передается во все моделирующие звенья, определяя их режим работы.

К этому моменту все моделирующие звенья имеют необходимые элементы группы причины для формирования следствия. Срабатывает алгоритм функциональной базы моделирующих звеньев, который вызывает индивидуальную для каждого процесса функцию $f_{\text{врем.}}$, определяющую время до ближайшего инициирующего взаимодействия. В данном примере вычисленные значения $f_{\text{врем.}}$ следующие: $D1: 0,3; D2: 0,5; C1: 0,1; C2: 0,05; TL1: 5; TL2: 5; RC: \infty.$

Далее результат выполнения функций помещается в новые элементы o_0 , которые, согласно связям, поступают в звено TS для анализа и вычисления времени до наступления ближайшего особого состояния (минимальное). На данном этапе это время равно 0,05. В качестве следствия формируется элемент o_0 , ук-зывающий моделирующим звеньям производить моделирование на вычисленное время.

После получения моделирующими звеньями элемента o_0 они переходят в режим моделирования.

Звено D . Согласно алгоритму ядра звена, состояние водите-лей не изменяется, на 0,05 уменьшается лишь время до очеред-ной реакции на дорожные условия $o_{1,1}: t = 0,25; o_{1,2}: t = 0,45$.

Звено C . Изменяется состояние ТС, а также формируется соответствующий элемент для звена RC :

$$\begin{aligned} o_{7,1}: a &= 10 \cdot 0 - 20 \cdot 0,3 = -6; & o_{7,1}: v_{max} &= 120 \cdot 0 = 0; \\ o_{5,1}: a_t &= 0,1 - 0,05 = 0,05; & o_{5,1}: b_t &= 0,1 - 0,05 = 0,05; \\ o_{7,2}: a &= 5 \cdot 0,2 - 10 \cdot 0 = 1; & o_{7,2}: v_{max} &= 80 \cdot 0,2 = 16; \\ o_{5,2}: a_t &= 0,05 - 0,05 = 0; & o_{5,2}: b_t &= 0,05 - 0,05 = 0. \end{aligned}$$

Звено TL . За время моделирования 0,05 в состоянии свето-форов лишь уменьшается время до переключения светового сигнала. Новые значения: $o_{8,1}: t = 5 - 0,05 = 4,75; o_{8,2}: t = 5 - 0,05 = 4,75$.

Звено RC . В данном звене производится расчет нового по-ложения и скоростей автомобилей через заданное время моде-лирования 0,05, а также обновление списка доступных водите-лям параметров дорожных условий.

Для первого автомобиля:

$$\begin{aligned} t &= \min(0,05, \max(0, (0 - 20) / -6)) = 3,3; \\ c:x &= 1,5 + 20 \cdot \cos(\pi/2) \cdot 0,05 - 6 \cdot \cos(\pi/2) \cdot 0,05^2/2 = 1,5; \\ c:y &= -12 + 20 \cdot \sin(\pi/2) \cdot 0,05 - 6 \cdot \sin(\pi/2) \cdot 0,05^2/2 = -11,5; \\ c:v &= 20 - 6 \cdot 0,05 = 19,7; \\ t &= 0,05 - 0,05 = 0. \end{aligned}$$

Для второго автомобиля аналогичным образом получаем:

$$\begin{aligned} c:x &= -10 + 12 \cdot \cos(0) \cdot 0,05 + \cos(0) \cdot 0,05^2/2 = 9,7; \\ c:y &= -1,5 + 12 \cdot \sin(0) \cdot 0,05 + \sin(0) \cdot 0,05^2/2 = -1,5; \\ c:v &= 12 + 0,05 = 12,05. \end{aligned}$$

Далее вновь наступает этап, на котором каждое моделирующее звено вычисляет время до своего ближайшего взаимодействия. Из этих времен выбирается минимальное и выполняется моделирование. Данный циклический процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто время моделирования всей системы.

После окончания заданного времени моделирования ТС успешно проезжают перекресток. Второй водитель уступает дорогу первому в соответствии с сигналом светофора, после чего проезжает сам на изменившийся разрешающий сигнал. Положение ТС после моделирования: первое ТС (1,5; 43,8), второе ТС (7,1; -1,5).

В рассмотренном примере дорожная ситуация разрешилась безаварийно. Если произвести еще достаточное количество экспериментов, то можно будет сделать вывод о безопасности дорожного участка. Путем дополнительного анализа определить его недостатки и мероприятия по модернизации.

5. Заключение

Предложен подход к моделированию движения на участках дорожно-транспортной сети, основанный на применении причинно-следственных комплексов, позволяющих учесть совместное влияние разнородных составляющих на дорожную ситуацию, включая человеческий фактор, играющий решающую роль при возникновении аварийных ситуаций.

Построенная модель движения на участке дорожно-транспортной сети позволяет решать ряд задач в автотранспортной системе. Среди них задачи прогнозирования параметров участка и проходящих транспортных потоков, а также некоторые переборные подходы к решению задачи поиска причин аварийных ситуаций. Модель может служить инструментом поддержки при проектировании новых узлов и оптимизации работы существующих. Объектом применения модели может также служить разного рода обучающее оборудование и программное обеспечение.

Литература

1. БУСЛЕНКО Н.П. *Моделирование сложных систем*. – М.: Наука, 1968. – 356 с.
2. ИВАНОВ А.С., ЛАПКОВСКИЙ Р.Ю., УКОВ Д.А., ФИЛИМОНЮК Л.Ю. *Кибернетический подход к моделированию разнородных процессов в мехатронных системах* // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – №1. – С. 16–20.
3. КЛИНКОВШТЕЙН Г.И., АФНАСЬЕВ М.Б. *Организация дорожного движения: Учеб. для вузов.* – 5-е изд., перераб. и доп. – М: Транспорт, 2001 – 247 с.
4. МИХЕЕВА Т.И. *Структурно-параметрический синтез систем управления дорожно-транспортной инфраструктурой*: Автореферат дис. докт. техн. наук. – Самара, 2007. – 33 с.
5. *Официальный сайт ГИБДД МВД России: Статистика ДТП*. – URL: <http://www.gibdd.ru/section/stat/> (дата обращения 27.06.2011).
6. *Проблемы теоретической кибернетики*: материалы XVI Международной конференции (Нижний Новгород, 20–25 июня 2011г.) / Нижегородский гос. ун-т; [под ред. Ю.И. Жеравлева]. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета, 2011. – С. 503–516.
7. РЕЗЧИКОВ А.Ф., ТВЕРДОХЛЕБОВ В.А. *Причинно-следственные модели производственных систем*. – Саратов: Издательский центр «Наука», 2008. – 137 с.
8. СЕМЕНОВ В.В. *Математическое моделирование транспортных потоков мегаполиса*. – Препринт №34 Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 2004.
9. ШВЕЦОВ В.И. *Математическое моделирование транспортных потоков* // Автоматика и телемеханика. – 2003. – №11. – 45 с.
10. SPERLING D. *Surviving Two Billion Cars: Transforming Vehicles, Fuels, and Mobility*. – URL: <http://www.almaden.ibm.com/institute/2009/resources/2009/presentations/DanielSperling-AlmadenInstitute2009.pdf> (дата обращения 04.07.2011).

CAUSE-EFFECT APPROACH TO TRAFFIC MODELING ON PROBLEM INTERVALS OF ROAD NETWORK

Roman Lapkovsky, Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, post-graduate (robitpub@gmail.com, +7-917-328-10-87).

Alexander Ivanov, Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Doctor of Science (ac_ivanov@info.sgu.ru).

Vladimir Ivaschenko, Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Doctor of Science, Scientific Secretary (ipt-muran@san.ru).

Abstract: We suggest an approach to traffic modeling on problem intervals of road networks. The approach is based on cause-effect complexes. It allows accounting for cumulative effect of heterogeneous components of traffic situation, including human factor, which is crucial in emergency situations. We use the suggested approach to model a single node of a road network. We describe both a structure of the model and details of its components. An example is given of traffic modeling on a regular crossroad.

Keywords: traffic system, road network, modeling, cause-effect complex.

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии М.В. Губко*