

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT



УДК 656.017: 004.89

DOI 10.12737/11589

## Концепции управления мобильными строительно-дорожными объектами\*

**Д. Я. Паршин<sup>1</sup>, Д. Г. Шевчук<sup>2\*\*</sup>**<sup>1, 2</sup>Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

## Management concepts of mobile road-builder machinery\*\*\*

**D. Y. Parshin<sup>1</sup>, D. G. Shevchuk<sup>2\*\*</sup>**<sup>1, 2</sup>Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью работы является определение свойств транспортных потоков мобильных строительно-дорожных объектов (МСДО) для повышения эффективности управления ими. Представлены результаты системного анализа задач управления МСДО, изложена концепция их решения и выполнена формализация задачи управления движением мобильных строительно-дорожных машин в постоянно изменяющихся условиях передвижения. Впервые сформулированы системные и структурные критерии оценки состояния мобильных строительно-дорожных объектов, проанализированы концепции управления группами подвижных объектов, даны рекомендации по выбору типа управления. Представлены математические модели транспортных потоков, устанавливающие зависимость скорости движения от плотности транспортного потока, а также математическая модель оптимизации маршрута движения мобильных строительно-дорожных объектов. В статье приведены стратегии адаптивного и интеллектуального управления группами подвижных объектов различной численности, а также представлены результаты регрессионного анализа модели движения мобильных объектов.

**Ключевые слова:** мобильные строительно-дорожные объекты, групповое управление, транспортные потоки, организация движения, оптимизация маршрута движения.

The work objective is to define the properties of the mobile road-building machinery (MRBM) traffic flows for the control effectiveness improvement. The results of the system analysis of the MRBM control tasks are presented. Their solution concept is presented; the traffic control problem formalization for the mobile road-building machines under the ever-changing conditions of movement is performed. For the first time, system and structural status assessment criteria for MRBM are formulated; the control concepts of the mobile objects groups are analyzed; recommendations for selecting the type of control are given. Mathematical models of the traffic flows establishing the dependence of the motion speed on the traffic density, and a mathematical model of the traffic route optimization for the mobile road-building machinery are presented. Strategies of the adaptive and intelligent control of the mobile objects groups of different numbers, as well as the results of the regression analysis of the mobility objects motion model are presented.

**Keywords:** mobile road-building machinery, group control, traffic flows, traffic management, traffic route optimization.

**Введение.** Вопросы управления подвижными объектами различного вида, безусловно, представляют научный интерес. При этом особенно остро стоит проблема взаимодействия указанных объектов в условиях недетерминированной среды функционирования. Сложившаяся в настоящее время ситуация требует улучшения качества работы транспортных комплексов, повышения средней скорости движения объектов, сокращения времени перемещения транспорта между пунктами назначения. Решению указанных задач способствует использование информационно-управляющих систем.

Учитывая темпы развития строительной отрасли, а также масштабы застройки современных мегаполисов, необходимо разрабатывать новые интеллектуальные системы управления поставками строительных материалов, обеспечивающие:

\*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

\*\*E-mail: hebeh@yandex.ru

\*\*\*The research is done within the frame of the independent R&D.

- эффективное использование транспортных и строительных машин;
- выбор оптимальных маршрутов движения по основным и вспомогательным дорогам.

В частности, следует:

- создавать новые модели подвижных объектов и их групп;
- разрабатывать оригинальные имитационные модели дорожной сети и самонастраивающиеся алгоритмы управления, обеспечивающие при необходимости их быструю перестройку.

Такие алгоритмы способны изменять маршруты движения, перераспределять транспортные потоки, учитывать скоростной режим на отдельных участках и оптимизировать транспортные затраты при обслуживании строительных объектов.

**Формализация задачи управления мобильными строительно-дорожными объектами.** Наибольший интерес представляет задача управления мобильными строительно-дорожными объектами (МСДО). Ее решение позволяет добиться соблюдения графика доставки конструкций и материалов на строительные площадки и сократить транспортные расходы. При этом необходимо выполнить комплекс управленческих задач. В первую очередь речь идет об обеспечении гибкого планирования маршрутов доставки стройматериалов и конструкций. Особенностью управления движением МСДО является возможность изменения маршрута в процессе движения транспорта с учетом текущего состояния трассы, транспортного запаздывания и средней скорости движения на отдельных участках.

Проведенный анализ показал, что при управлении МСДО необходимо решить следующие задачи:

- контроль скорости и маршрута движения МСДО в реальном времени;
- сбор и обработка информации об отклонении МСДО от графика и маршрута движения;
- выбор оптимального маршрута движения и последующая его корректировка;
- контроль состояния технической среды перемещения объектов, определение препятствий и изменение скорости перемещения;
- формирование законов управления движением МСДО и их корректировка с учетом состояния выбранного маршрута движения.

**Концепция управления подвижными объектами и их группами.** Применительно к МСДО используются централизованный или комбинированный принципы управления. Формирование управляющих воздействий для подвижных объектов основывается на мониторинге их состояния [1]. Использование различных стратегий управления подвижными объектами и их группами позволило установить следующее. В случае применения централизованной стратегии при росте численности объектов в группе значительно увеличивается время принятия решений (в сравнении с децентрализованной стратегией, рис. 1).

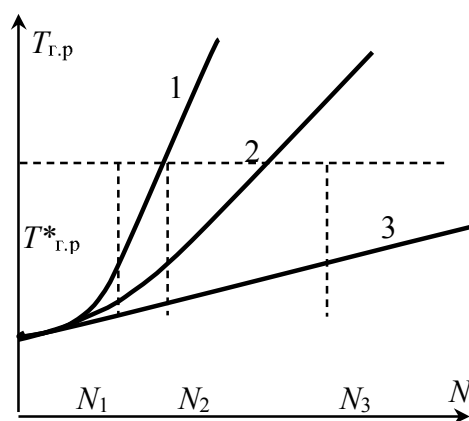


Рис. 1. Зависимость времени принятия решения при различных стратегиях управления

При централизованном управлении решения о действиях объектов группы принимаются одним вычислителем, что требует значительного времени на обработку данных (рис. 1, график 1). При этом в соответствии с увеличением числа объектов в группе экспоненциально возрастает сложность задачи, а также время ее решения. Децентрализованное управление позволяет каждому подвижному объекту принимать самостоятельное решение, обмениваясь информацией с другими объектами группы для оптимизации действий. Время управления при росте числа подвижных объектов увеличивается постепенно (рис. 1, график 3). Очевидно, что при смешанной стратегии управления увеличение времени решения будет демонстрировать некоторое промежуточное значение (рис. 1, график 2). Представленные зависимости позволяют обоснованно выбирать тип стратегии управления МСДО. В первую очередь следует определить номинальное время обслуживания объектов в группе  $T_{а.о}^*$  (рис.1). Как видно из рис. 1, при количестве объектов в группе меньше  $N_1$  предпочтение следует отдавать централизованной стратегии. Если число объектов в группе превышает  $N_1$ ,

предпочтение следует отдавать децентрализованной стратегии управления. Смешанную стратегию целесообразно использовать при количестве объектов от  $N_2$  до  $N_3$ .

**Системные и структурные критерии оценки состояния подвижных объектов.** Управление МСДО невозможно без учета свойств и параметров состояния объектов. Кроме того, необходима формальная постановка задачи группового управления [2]. Рассмотрение вопросов группового управления подвижными объектами требует исследования показателей качества управления и невозможно без учета особенностей технической среды функционирования. Опишем состояние подвижных объектов, техносреды и группы объектов с помощью вектор-функции.

Состояние одиночного подвижного объекта  $M$  представим вектор-функцией:

$$\mathbf{M}(t) = [m_1(t), m_2(t), \dots, m_n(t)]^T, \quad (1)$$

где  $m_i(t)$  — переменные текущего состояния объекта, определяемые видом объектов.

Состояние среды, в которой функционирует подвижный объект  $M$ , опишем вектор-функцией:

$$\mathbf{E}(t) = [e_1(t), e_2(t), \dots, e_l(t)]^T, \quad (2)$$

где  $e_i(t)$  — переменные состояния среды, определяемые видом рассматриваемых задач.

В качестве переменных состояния среды рассматриваются параметры транспортных потоков, координаты препятствий на маршруте, коэффициенты взаимной корреляции плотности потоков на параллельных полосах движения, средние скорости движения транспортных потоков и др.

При групповом управлении МСДО кроме вектор-функций  $\mathbf{M}(t)$ , описывающих поведение каждого объекта, введем описание состояния группы, состоящей из  $k$  взаимосвязанных подвижных объектов. Для практических целей взаимодействие группы объектов лучше описывать вектором состояния в момент времени  $t$  вида:

$$\tilde{\mathbf{N}}(t) = [\tilde{n}_1(t), \tilde{n}_2(t), \dots, \tilde{n}_k(t)]^T, \quad (3)$$

где  $c_i(t)$  — переменные состояния группы подвижных объектов, определяемые их назначением и решаемыми задачами.

При составлении графика обслуживания строительных объектов определяется плановое время, за которое строительная машина проходит весь маршрут  $T_m$  и его отдельные участки, совпадающие с участками других маршрутов группы:  $\Delta T_j (j=1, n)$ ,

где  $n$  — число совпадающих участков.

Основным критерием качества управления группы объектов в данном случае является соблюдение графика движения транспортных средств.

Для полного описания состояния подвижных управляемых объектов необходимо формализовать цель управления в виде вектор-функции управляющих воздействий, учитывающих динамику подвижных объектов и технической среды их функционирования:

$$\mathbf{U}(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)]^T. \quad (4)$$

Используя описанные векторы состояния (2), (3) и (4), состояния одиночного объекта  $\mathbf{M}(t)$  представим в виде:

$$\mathbf{M}(t) = F_m [\mathbf{C}(t), \mathbf{E}(t), \mathbf{U}(t), \dot{\mathbf{C}}(t), \dot{\mathbf{E}}(t)], \quad (5)$$

где  $\dot{\mathbf{C}}(t), \dot{\mathbf{E}}(t)$  — динамические составляющие группового поведения объектов и технической среды их функционирования.

Таким образом, состояние подвижных объектов определяется не только управляющими и возмущающими воздействиями, но и является результатом динамического взаимодействия рассматриваемых объектов и транспортных потоков среды. Под влиянием управления  $\mathbf{U}(t)$  объекты могут изменять свое состояние  $\mathbf{M}(t)$  и состояние группы в целом. Изменения состояния объектов в общем случае носят непрерывный характер и описываются дифференциальными уравнениями:

$$\dot{\tilde{\mathbf{N}}}(t) = F_n [\mathbf{M}(t), \mathbf{E}(t), \mathbf{U}(t)]. \quad (6)$$

В общем виде задача управления подвижным объектом заключается в определении последовательности его состояний  $\mathbf{M}(t)$ , которая обеспечивает достижение сформулированной цели функционирования объекта. Критерием поиска оптимальной последовательности действий является экстремум функционала

$$Y = M_n(E_n, t_n) + \int_{t_i}^{t_k} F(\mathbf{M}(t), \mathbf{E}(t), \mathbf{U}(t), t) dt, \quad (7)$$

где  $t_n, t_k$  — начальный и конечный момент времени.

Использование данного функционала позволяет учесть влияние среды и оценить качество процесса управления. В случае подвижных объектов, выполняющих технологические операции, с помощью сформулированного функционала можно определить оптимальный маршрут движения  $S(t)$  или оптимальные действия объекта.

**Математическое моделирование маршрутов движения МСДО.** Задачи моделирования движения МСДО разделяются на две основные группы:

- моделирование плана местности и планирование маршрута движения в соответствии с заданным графиком выполнения работ;
- моделирование динамики движения МСДО при отработке спланированного маршрута.

Необходимость в таких моделях возникает при создании адаптивных и интеллектуальных систем управления строительно-дорожными машинами.

При моделировании движения важным является отражение в моделях транспортной сети технических средств организации движения. Предпочтительным решением этой задачи является разработка специальных модулей технических средств и способа их введения в модель транспортно-дорожной среды [3]. При этом технические средства организации движения описываются множеством  $R = \{R_r\}$ , содержащим в себе подмножества светофорных объектов  $R_s = \{r_{si}\}$ , дорожных знаков  $R_z = \{r_{zi}\}$ , линий дорожной разметки  $R_l = \{r_{li}\}$ . Причем эти объекты расположены на дугах  $\tilde{e}_i \in E$  модели транспортной среды:

$$\forall r_i \in R(t) \exists! e_i \in E : r_i \text{ is located } e_i. \quad (8)$$

При дислоцировании в модель на участке расположения дуги технического средства этот объект становится весовой характеристикой дуги:

$$\forall r_i \in R(t), \forall e_i \in E, r_i \text{ is located } e \Leftrightarrow \exists \Theta_{xi} \in \Theta(t):$$

$$(r_i \text{ is located } \Theta_{xi}) \wedge (e_i \text{ is located } \Theta_{xi}) \wedge (r_i \text{ is action } e_i), \quad (9)$$

где  $\Theta(t)$  — вектор-функция весовых характеристик.

Зона действия таких модулей, вводимых в состав модели транспортной среды, ограничивается сечением, перекрестком, перегонном, магистралью или всей областью функционирования мобильного объекта.

Как показали результаты наблюдений за МСДО и результаты моделирования процессов их движения, для управления подвижными объектами более адекватной является математическая модель, реализующая зависимость, представленную на рис. 2.

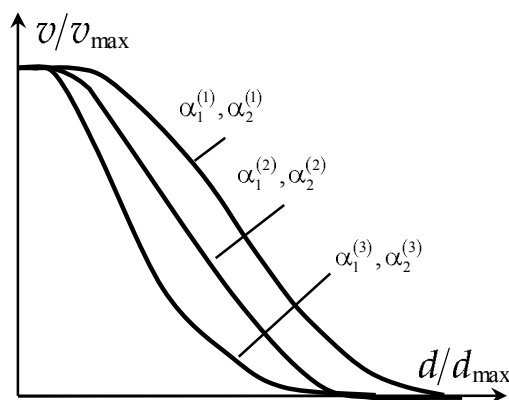


Рис. 2. Взаимозависимость скорости и плотности транспортного потока

В этом случае зависимость между скоростью и плотностью описывается соотношением [3]:

$$v = v_{\max} \left( \exp \left( \alpha_1 \frac{-d^2}{d_{\max}^2} + \alpha_2 \frac{-d^2}{d_{\max}^2} \right) \right), \quad (10)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — динамические коэффициенты среды, определяемые на основе экспериментальных исследований;  $v_{\max}$ ,  $d_{\max}$  — максимальные значения скорости и плотности потока.

Тогда интенсивность движения будет равна:

$$q = dv_{\max} \left( \exp \left( \alpha_1 \frac{-d^2}{d_{\max}} + \alpha_2 \frac{-d^2}{d_{\max}} \right) \right) \quad (11)$$

Начальный участок модели адекватен реальному процессу транспортного потока, когда объекты движутся свободно и расстояние между ними больше динамического минимума, обеспечивающего безопасность движения и необходимую маневренность транспортных единиц.

Если речь идет о вынужденном движении с синхронизацией скоростей подвижных объектов, целесообразно описывать транспортный поток на основе разрывных моделей Ромпома — Блимера:

$$v = v_{\max} \frac{d_p (d_{\max} - d)}{d_{\max} d} \rightarrow d_p < d < d_{\max}, \quad (12)$$

где  $d_p$  — плотность транспортного потока, соответствующая пропускной способности.

Учитывая разновидности транспортных единиц, в эту модель следует ввести динамические коэффициенты подвижных объектов. Используя понятие динамической безопасности, введем динамические коэффициенты длины и ширины подвижного объекта:

$$\gamma_l = \frac{l_d}{l_s}, \quad \gamma_b = \frac{b_d}{b_s}, \quad (13)$$

где  $l_d$  и  $b_d$  — динамические длина и ширина объекта;  $l_s$  и  $b_s$  — статические длина и ширина объекта.

При этом динамические параметры  $l_d$  и  $b_d$  зависят от скорости движения — следовательно, динамические коэффициенты длины и ширины также являются переменными и определяются скоростными характеристиками потока. Кроме того, значения этих коэффициентов требуют нормализации в зависимости от габаритов мобильного строительного объекта.

**Оптимизация маршрута движения МСДО.** При управлении МСДО с произвольной маршрутизацией одной из главных задач является выбор оптимального маршрута с использованием объектных и темпоральных моделей территории [4]. Решение задачи должно основываться на задании начального и конечного пункта [5], [6], [7]. Кроме того, возможно задание одной или нескольких промежуточных точек по указанию диспетчера. После ввода данных алгоритм управления должен определить кратчайший маршрут, отобразить его на карте территории и выдать описание маршрута. Для поиска оптимального маршрута лучше использовать ориентированный граф, включающий множество альтернативных маршрутов, построенный на основе объектной модели территории (рис. 3) [8].

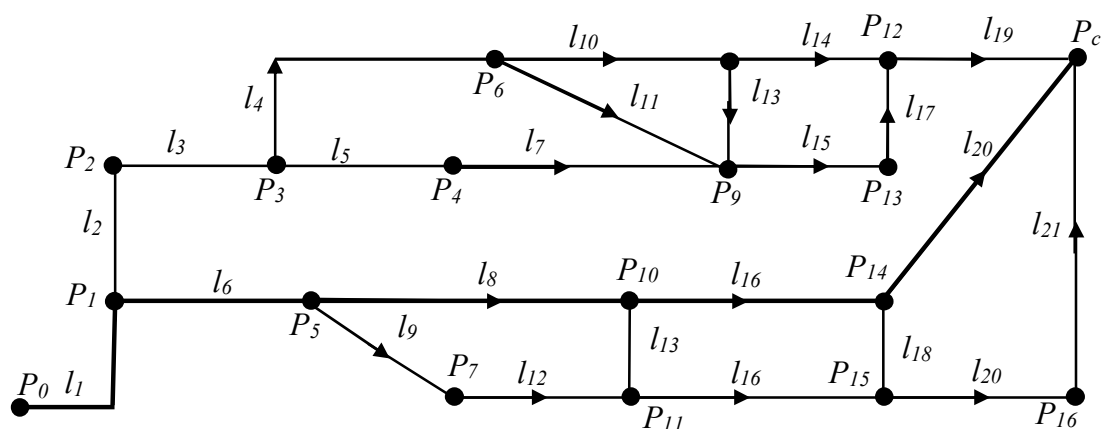


Рис. 3. Ориентированный граф альтернативных маршрутов движения

Каждую дугу между узлами характеризует вес — длина пути между соответствующими узлами. В соответствии с длиной дуги  $l_j$  определяются результирующие длины альтернативных маршрутов:

$$S_1 = \sum_{A \rightarrow B} l_j, \quad S_2 = \sum_{A \rightarrow B} l_i, \dots, S_M = \sum_{A \rightarrow B} l_k. \quad (14)$$

Оптимальным для проезда считается маршрут, на котором обеспечивается  $\min S_j$ . Однако при таком подходе не всегда обеспечивается минимизация времени обслуживания [9], [10]. Поэтому мы предлагаем после определения оптимального маршрута  $P_0 \rightarrow P_1 \rightarrow P_5 \rightarrow P_{10} \rightarrow P_{14} \rightarrow P_c$  провести анализ состояния транспортной сети и обстановки на выбранном маршруте, выполнить его корректировку с учетом заторов на дороге (рис. 3). Корректировка выполня-



ется на основе критерия минимизации времени проезда между пунктами  $P_0$  и  $P_c$ , в качестве дополнительной информации используются данные мониторинга состояния дорог.

Следует отметить, что на работу группы МСДО на маршруте влияет ряд внешних факторов. Для исследования этих воздействий используется модель маршрута движения объекта, формируемая на основе модели транспортной сети. Для моделирования динамики движения объектов к модели маршрута подключаются источники возмущающих воздействий, которые в случайные моменты времени формируют потоки объектов на перекрестках и в начале маршрута. При этом каждому объекту случайным образом задается время появления на перекрестке и полоса движения. Кроме того, можно задавать интенсивность потоков на каждой полосе.

Для оценки характеристик транспортного маршрута сети с нечеткими пропускными способностями следует рассматривать ее в виде несвязанного графа, каждая дуга которого характеризуется пропускной способностью  $q(x_i, x_j)$ . Началом сети является вершина-источник  $x_0 = P_0$ ; вершина-сток —  $x_n = P_c$ .

Присутствие нечетких параметров в рассматриваемых задачах обусловлено неопределенностью, возникающей под воздействием различных факторов внешней среды (в частности, непредвиденных ситуаций на маршрутах). В результате анализа движения МСДО в транспортных потоках можно выделить следующие разновидности задач:

- определение максимального потока транспортной среды с нечеткими пропускными способностями;
- определение минимальной стоимости маршрута с нечеткими данными;
- оценка максимального динамического потока с нечеткими данными;
- задача о потоках с усилениями с нечеткими данными.

При решении задач определения максимального потока транспортной сети интересны пропускные способности, представленные в виде:

- нечетких чисел LR-типа,
- интервалов.

Нечеткие пропускные способности в виде нечетких чисел LR-типа задаются:  $\bar{q}_{ij} = (0, q_{ij}; 0, \beta_{ij})_{L-R}$ , где  $q_{ij} + \beta_{ij} = \bar{q}_{ij}$ .

Распределение функции принадлежности нечеткого числа имеет вид:

$$\mu_{q_{ij}} = \begin{cases} 1, & d_{ij} < q_{ij} \\ [0, 1], & q_{ij} \leq d_{ij} \leq \bar{q}_{ij} \\ 0, & d_{ij} > \bar{q}_{ij} \end{cases} \quad (15)$$

В задаче о нахождении нечеткого максимального потока речь идет о потоке  $d_v = \{d_{ij} \in R(x_i, x_j) \in A\}$  от источника к стоку. В интервале  $[0; 1]$  функция не обязательно линейна и выполняются условия:

$$v \in \bar{F}; d_{ij} \leq \bar{q}_{ij} \rightarrow (x_i, x_j) \in A; \sum_{x_j \in I^+(x_i)} d_{ij} - \sum_{x_i \in I^-(x_j)} d_{ji} = \begin{cases} v, & x_i = s \\ -v, & x_i = t \\ 0, & x_i \in x/(s, t) \end{cases} \quad (16)$$

Первое условие  $v \in \bar{F}$  означает, что значение  $v$  имеет наибольшую степень принадлежности к  $\bar{F}$ , где  $\bar{F}$  представляет собой набор значений потока (в пределах интервала), которые допускает эксперт в каждом конкретном случае. Второе условие в (16) также означает, что поток  $d_{ij}$  меньше либо равен  $\bar{q}_{ij}$  с наибольшей степенью принадлежности. Большее значение функции принадлежности  $\mu_{\bar{F}}(v)$  показывает, что лицо, принимающее решение, допускает большее значение потока  $v$ . Значение  $\bar{F}$  представляет собой нечеткое число LR-типа:  $\bar{F} = (v, +\infty; a_F; 0)_{L_F-R_F}$ . Выражения (16) интерпретируются следующим образом: необходимо найти поток, имеющий значение  $v$ , причем условие сохранения потока  $\sum_{ij} d_{ij} \leq \bar{q}_{ij}$  не должно быть нарушено. В работе для решения этой задачи выбран подход, основанный на агрегации целевой функции и ограничений. Предложенный алгоритм решения позволяет найти поток, имеющий наибольшую величину и одновременно наиболее удовлетворяющий нечеткому ограничению на пропускные способности. Нечеткие пропускные способности задаются в виде интервалов:  $\bar{q} = [q_l, q_r]$ , где  $q_l, q_r$  — соответственно левые и правые границы пропускной способности маршрута.

Алгоритм планирования оптимального маршрута включает следующие основные этапы поиска:

- преобразование графа на основе контурной модели;
- нахождение опорных вершин, через которые проходит маршрут объекта;
- минимизация пути движения с использованием градиентного метода на основе линейных ориентиров.

На первом этапе строится матрица смежности  $A = \{a_{ij}\}_{n \times n}$ , элементы которой представляют собой время прохождения подвижным объектом расстояния от одной вершины графа  $i$ -й области до другой вершины  $j$ -й области через общую границу по формуле

$$a_{ij} = s_{ij} / v_{ij}, \quad (17)$$

где  $a_{ij}$  — вес дуги, представляющий собой время прохождения отрезка между вершинами  $i$  и  $j$ ;  $s_{ij}$  — расстояние от  $i$ -й вершины до вершины  $j$ -й области;  $v_{ij}$  — скорость движения между  $i$ -й и  $j$ -й вершинами.

Для поиска пути на графе можно воспользоваться модифицированным алгоритмом Дейкстры, в котором используются индексно-матричный метод поиска и метод градиентной оптимизации маршрута движения объекта. В качестве входных данных рассматриваются координаты начала и конца маршрута. В качестве критерия оптимальности используется минимум времени перемещения. В ходе решения задачи оптимизации определяется маршрут движения, состоящий из набора дуг, связывающих определенные вершины графа.

Целевая функция для оптимизации маршрута движения имеет вид:

$$I_{opt}(D_i) = \sum_{i=1}^n t_i(S_i) \rightarrow \min_{P_i \in G}, \quad (18)$$

где  $P_i$  — вершины графа транспортно-дорожной среды, характеризуемые координатами  $(x_i, y_i)$  расположения площадей и перекрестков;  $S_i$  — дуги графа между вершинами  $P_{i-1}$  и  $P_i$ ;  $t_i(S_i)$  — время проезда  $S_i$  расстояния от  $(i-1)$ -й до  $i$ -й границы.

Время  $t_i(S_i)$  определяется через расстояние  $s_{ij}$  и среднюю скорость движения потока на данном участке  $V_{ij}$ :  $t(S_i) = s_i / v_i$ .

В качестве ограничений целевой функции следует использовать минимально допустимую скорость движения потока на участке при выборе маршрута:

$$\begin{cases} R_l(S_i) = v_i \geq v_{\min}, \\ R_d(S_i) = v_i \leq v_{\max}(S_i), \end{cases} \quad (19)$$

где  $v_{\min}$  и  $v_{\max}(S_i)$  — минимальное и максимальное допустимые значения скорости на рассматриваемом участке движения  $S_i$ , ограничивающие  $i$ -ю компоненту целевой функции сверху и снизу.

Учитывая, что ограничения имеют вид неравенств, воспользуемся методом проекции градиента. В этом случае на каждом  $k$ -м шаге итерации выполняется процедура возврата компоненты вектора  $v_i(k)$  на допустимое множество значений  $S$ , если  $v_i(k) \notin S$ , т. е. не удовлетворяет условию ограничений (19). Это реализуется за счет присвоения  $v_i(k)$  одного из граничных значений:  $v_{\min}$  или  $v_{\max}$ .

При планировании маршрута движения в качестве начального приближения  $I_{opt}(0)$  принимается одно из направлений смежных дуг рассматриваемой транспортной среды при предельных скоростях движения:

$$I_{opt}(0) = I_{opt}(v_{\min}) \in S \vee I_{opt}(v_{\max}) \in S. \quad (20)$$

Градиент целевой функции определяется значениями каждой компоненты вектора, зависит от положения соответствующей границы и в аналитическом виде представим выражением

$$\frac{dI_{opt}(S)}{ds_i} = \frac{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}{v_i \cdot \Delta s_i^2} + \frac{\Delta x_{i+1}^2 + \Delta y_{i+1}^2}{v_{i+1} \cdot \Delta s_{i+1}^2}, \quad (21)$$

где  $\Delta x_i$  и  $\Delta y_i$  — приращение координат на участке движения объекта.

Для реализации пошаговой работы алгоритма необходимо воспользоваться методом градиентной оптимизации Флетчера — Ривса и методом проекции градиента. На каждой итерации работы алгоритма осуществляется проверка выполнения критерия останова, корректировка в случае необходимости шага поиска и проверка на заикливание. В качестве критерия останова выбирается неравенство  $\|S(k) - S(k-1)\| \leq \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  — допустимая ошибка поиска.

Алгоритм реализует одномерный поиск методом золотого сечения по параметру  $\lambda_k$ , минимизирующий функцию

$$G(\lambda_k) = I_{opt}(S(k) + \lambda_k \cdot \xi_k) \rightarrow \min_{\lambda_k}, \quad (22)$$

где  $\xi_k$  — антиградиент, начальное приближение которого задается в виде  $\xi_0 = -\nabla I_{opt}(S(0))$ .

Приближение на шаге итераций вычисляется по формуле  $S(k+1) = S(k) + \lambda_k \cdot \xi_k$ , а направление поиска определяется соотношением

$$\xi_{k+1} = -\nabla I_{opt}(S(k+1)) + \xi_k \frac{\|\nabla I_{opt}(S(k+1))\|^2}{\|\nabla I_{opt}(S(k))\|^2}. \quad (23)$$

Как показали исследования описанного алгоритма, при его работе возможно заикливание при подходе к точке минимума  $S(k)$ . Это связано с неправильным выбором  $\lambda_k$  — большое значение способствует заикливанию процесса поиска вокруг точки минимума  $S(k)$ . Для исключения заикливания программы поиска необходимо ввести дополнительную проверку на заикливание.

Исследования алгоритма поиска маршрута движения мобильных строительно-дорожных объектов показали следующее. Данный алгоритм, исходя из заданного графа транспортной сети, обеспечивает нахождение кратчайшего маршрута движения, удовлетворяющего заданным ограничениям по скоростному режиму.

**Выводы.** Для подтверждения эффективности использования разработанной модели проведены экспериментальные исследования, целью которых было уточнение параметров, характеризующих свойства транспортных потоков МСДО. В результате эксперимента получена временная зависимость величины  $f_s(t)$ , которая приведена на рис. 4.

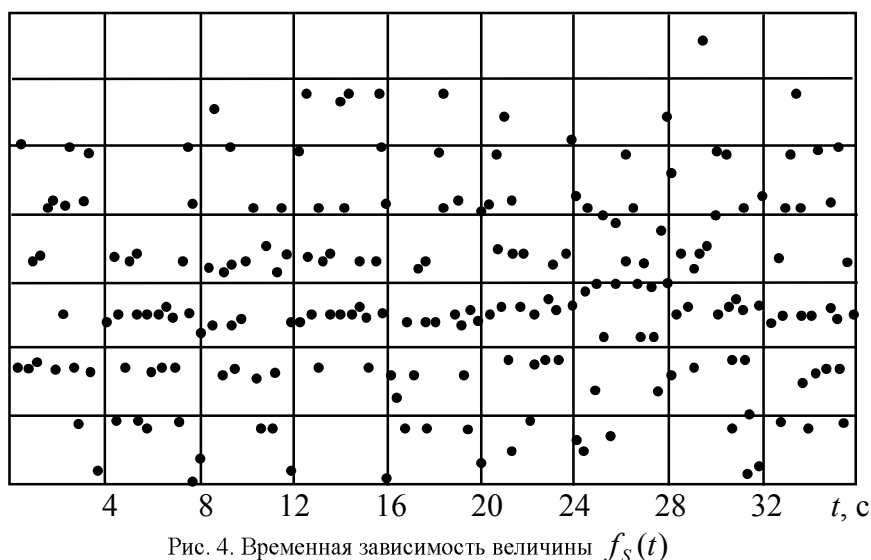


Рис. 4. Временная зависимость величины  $f_s(t)$

Анализ временного ряда подтвердил нормальный закон распределения. Использование вариационного ряда позволило получить смешанную модель авторегрессии, описываемую выражением

$$f_s(t) = 0,258 + 0,789 \cdot f_s(t-1) + a(t) + 0,092 \cdot a(t-1), \quad (24)$$

где  $a(t)$  — белый шум.

Достоверность модели подтверждена малыми значениями стандартных ошибок параметров модели, которые не превышают 6,2 %. Сравнение результата прогнозирования с экспериментальными данными позволило установить, что среднее значение доли по данным моделирования составляет 0,2692, а вычисленное на основе экспериментальных данных — 0,2703. При этом среднеквадратичное отклонение в первом случае равно 0,1349, а во втором — 0,1213.

Полученные значения подтверждают высокое соответствие результатов моделирования реальным данным. Следовательно, модель авторегрессии может быть использована для прогнозирования условий проезда подвижными объектами регулируемых перекрестков на маршруте движения.

### Библиографический список

1. Паршин, Д. Я. Управление движением строительных роботов / Д. Я. Паршин, О. Л. Цветкова // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2007. — № 12. — С. 13–16.
2. Паршин, Д. Я. Интеграция систем управления строительных холдингов на основе нейросетевой координации / Д. Я. Паршин, Д. Н. Огородний, Р. Г. Шитова // Новые технологии. — 2012. — № 3. — С. 95–101.
3. Тарасик, В. П. Интеллектуальные системы управления автотранспортными средствами / В. П. Тарасик. — Москва : Технопринт, 2004. — 264 с.



4. Тимофеев, А. В. Системы цифрового и адаптивного управления роботом / А. В. Тимофеев, Ю. В. Экало. — Санкт-Петербург : Издательство СПбГУ, 1999. — 248 с.
5. Месхи, Б. Ч. Концепция развития сети канатного метро в Ростове-на-Дону / Б. Ч. Месхи, А. А. Короткий, В. Б. Маслов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2011. — Т. 11, № 8 (59), вып. 2. — С. 1348–1355.
6. Итоги и перспективы развития исследований в области интеллектуального управления мехатронными технологическими системами / А. К. Тугенгольд [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2010. — Т. 10, № 5 (48). — С. 648–666.
7. Kerner, B. S. Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control: The Long Road to Three-phase Traffic Theory / B. S. Kerner. — New York : Springer, 2009. — 271 p.
8. Kesur, K. Advances in Genetic Algorithm Optimization of Traffic Signals / K. Kesur // Journal of Transportation Engineering. — 2009. — Vol. 135, № 4. — P. 160–173.
9. Osorio, C. A surrogate model for traffic optimization of congested networks: an analytic queueing network approach / C. Osorio, M. Bierlaire // Report TRANSP-OR. — 2009. — Aug. 25th. — 23 p.
10. Traffic control systems handbook / DUNN Engineering Associates ; Siemens Intelligent Transportation Systems. — Washington : Federal Highway Administration, 2005. — 368 p.

## References

1. Parshin, D.Y., Tsvetkova, O.L. Upravlenie dvizheniem stroitel'nykh robotov. [Motion control of construction robots.] Mechatronics, Automation, Control, 2007, no. 12, pp. 13–16 (in Russian).
2. Parshin, D.Y., Ogorodniy, D.N., Shitova, R.G. Integratsiya sistem upravleniya stroitel'nykh kholdingov na osnove neyrosetvoy koordinatsii. [Integration of building holdings control systems based on neuronet coordination.] New Technologies, Maykop, 2012, no. 3, pp. 95–101 (in Russian).
3. Tarasik, V.P. Intellektyal'nye sistemiy upravleniya avtotransportnymi sredstvami. [The vehicles intelligent control systems.] Moscow: Technoprint, 2004, 264 p. (in Russian).
4. Timofeyev, A.V., Ekalo Y.V. Sistemiy cifrovogo i adaptivnogo upravleniya robotov. [Systems of digital and adaptive control of robots.] Saint Petersburg: Izdatel'stvo SPbGU, 1999, 248 p. (in Russian).
5. Meskhi, B.C., Korotkiy, A.A., Maslov, V.B. Kontseptsiya razvitiya seti kanatnogo metro v Rostove-na-Donu. [Vision of cable metro network in Rostov-on-Don.] Vestnik of DSTU, 2011, no. 8(59), iss. 2, pp. 1348–1355 (in Russian).
6. Tugengold, A.K., Dimitrov, V.P., Borisova, L.V., Lukyanov, E.A., Gerasimov, V.A. Itogi i perspektivy razvitiya issledovaniy v oblasti intellektualnogo upravleniya mehatronnymi tehnologicheskimi sistemami. [Mechatronics technological systems intellectual management prospects and results.] Vestnik of DSTU, 2010, no. 5(48), pp. 648–666 (in Russian).
7. Kerner, B.S. Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control: The Long Road to Three-phase Traffic Theory [Text]. New York: Springer, 2009, 271 p. — ISBN 978-3-642-02605-8.
8. Kesur, K. Advances in Genetic Algorithm Optimization of Traffic Signals [Text]. Journal of Transportation Engineering, 2009, vol. 135, no. 4, pp. 160–173.
9. Osorio, C., Bierlaire, M. A surrogate model for traffic optimization of congested networks: an analytic queueing network approach [Text]. Report TRANSP-OR, 2009, vol. 90825, pp. 1–23.
10. Traffic control systems handbook [Text] U.S.F.H. Administration, P.-W. and Associates. New York: Springer, 2005, 478 p.

Поступила в редакцию 05.11.2014

Сдана в редакцию 06.11.2014

Запланирована в номер 10.04.2015