

В. Н. Ефанов, Л. Р. Саяпова

АЛГОРИТМЫ МАРШРУТИЗАЦИИ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

Предлагается методика оптимизации маршрутов движения в интеллектуальных транспортных системах по векторному критерию. Отдельные составляющие этого вектора оценивают как расстояние между начальной и конечной точками маршрута, так и комплекс показателей, учитывающих уровень безопасности движения по выбранному маршруту. Для нахождения пути минимальной суммарной длины предлагается использовать модифицированный алгоритм Дейкстры. Множество эффективных с точки зрения безопасности маршрутов строится с использованием алгоритма Йена. *Алгоритм; критерий; транспорт; оптимизация*

Интеллектуальные транспортные системы (ИТС) – это комплекс информационно-навигационных систем дистанционного мониторинга и управления транспортными средствами, обеспечивающих оптимизацию работы последних и повышение безопасности перевозок. В отличие от простых навигационных систем ИТС обеспечивает всесторонний контроль за состоянием транспортного средства, включая его местонахождение, маршрут поездки, график движения, скоростной режим, события на борту, условия перевозки груза и др. [1]. Таким образом, ИТС обеспечивают устойчивое, эффективное, экономичное и безопасное функционирование транспорта за счет придания активным элементам транспортной системы свойств интеллектуального (адаптивного) поведения.

В связи с этим ИТС получают все более широкое распространение во всем мире. Ведущими международными ассоциациями ИТС являются: ITS-Europe (ERTICO), ITS-America, ITS-Japan, ITS-China. ERTICO была создана в рамках «Концепции интеллектуальной мобильности», принятой Европейским Союзом в 2006 г. В 2002 г. в США принята программа национальной интеллектуальной транспортной системы, рассчитанная на десять лет, которая охватывает все уровни планирования, от стратегического до текущего, и правовую основу, гарантирующую на законодательном уровне участие государства, в том числе финансовое, в исследованиях, разработках и развертывании. Стратегия развития ИТС в Японии, разработанная в 2003 г., преследует следующие цели: нулевые потери на дорогах, нулевые задержки на дорогах, нулевые неудобства. В 2007 г. принята «Стратегия развития ИТС Китая», ее продвиже-

ние осуществляется под управлением Национального центра инжиниринга и технологий ИТС.

В России формирование единой национальной платформы развития рынка ИТС осуществляется в рамках общественной организации – Некоммерческого партнерства «Интеллектуальные Транспортные Системы – Россия» (НП «ИТС-Россия»), которое объявило своей миссией объединение профессионального сообщества для поддержки политики и содействия усилиям Правительства в формировании и продвижении в РФ интеллектуальных транспортных систем. Подписанное в июне 2011 г. соглашение о стратегическом сотрудничестве Республики Башкортостан с НИС ГЛОНАСС предусматривает создание единой интеллектуальной транспортной системы Уфы, включающей подсистемы мониторинга пассажирских перевозок, сбора платежей и автоматизированного управления дорожным движением.

Одной из важнейших функций ИТС, определяющей ее прагматическую ценность, является выбор оптимального маршрута, оперативное отображение текущего положения транспортного средства на географической карте и сопровождение последнего при следовании по маршруту. В существующих автомобильных навигационных системах при выборе маршрута движения используется единственный критерий – расстояние между начальной и конечной точками маршрута. При всей универсальности этого показателя он не учитывает всей совокупности условий, влияющих на эффективность выполнения транспортных операций. В связи с этим в данной работе предлагается дополнительно использовать комплекс показателей, учитывающих уровень безопасности движения по выбранному маршруту.

1. ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ВЕКТОРНОГО КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ МАРШРУТОВ

При формировании векторного критерия необходимо исходить из того, что оценочные функции должны иметь конкретную количественную шкалу, и должна существовать объективная исходная информация, на основе которой количественные оценки могут быть рассчитаны. С учетом этого требования в число оценочных функций были включены следующие показатели:

- оценка качества состояния автомобильных дорог (ϵ_1);
- оценка аварийности на участках дорог (ϵ_2);
- оценка условий дорожного движения (ϵ_3).

Оценка качества состояния автомобильных дорог позволяет учесть потребительские свойства дороги – совокупность ее транспортно-эксплуатационных показателей, непосредственно отвечающих интересам пользователей. К потребительским свойствам относятся: скорость, непрерывность, безопасность и удобство движения, пропускная способность и уровень загрузки движением, способность пропускать автомобили и автопоезда с разрешенными для движения по дорогам общего пользования осевыми нагрузками, общей массой и габаритами, экологическая безопасность, эстетические и другие свойства.

Порядок и методика оценки качества состояния автомобильных дорог регламентируется целым рядом нормативных документов, в частности, Отраслевым дорожным методическим документом ОДМ 218.0.000-2003 «Руководство по оценке уровня содержания автомобильных дорог», утвержденным распоряжением Государственной службы дорожного хозяйства.

Согласно этому документу, для получения объективной информации о фактическом уровне содержания дорог, участков дорог, сети дорог осуществляется специальный инспекционный контроль. Этот контроль позволяет оценить качество следующих элементов дорожной сети:

- конструктивного элемента дороги на участке в 1 км: земляного полотна, элементов водоотвода, полосы отвода; проезжей части (включая используемые съезды); искусственных сооружений; элементов обустройства, обстановки и озеленения дороги;

- одного километра дороги;
- автомобильной дороги в целом (участка дороги);
- сети автомобильных дорог.

При этом оценка качества состояния автомобильных дорог зависит от уровня их потребительских свойств, которые определяются следующими признаками:

- автомобильные дороги, относящиеся к автомагистралям;
- автомобильные дороги 1 категории;
- автомобильные дороги 2 категории;
- автомобильные дороги 3 категории;
- автомобильные дороги 4 и 5 категории, имеющие покрытия из битумоминеральных смесей;
- автомобильные дороги 4 и 5 категории, имеющие покрытия из обработанных и не обработанных щебеночных, гравийных, песчано-щебеночных, песчано-гравийных покрытий;
- грунтовые автомобильные дороги.

В качестве основного критерия оценки качества состояния дорог принимается количество дефектов содержания. В упомянутом «Руководстве» принято три нормативных уровня содержания дорог (см. табл. 1) – допустимый, средний, высокий, и один не нормативный уровень – недопустимый, при котором не выполняются требования, предъявляемые к обеспечению безопасности движения.

При оценке фактического уровня содержания дорог определяются уровень содержания каждого километра дороги, соотношения количества на дороге километров с недопустимым, допустимым, средним и высоким уровнем содержания и усредненный показатель уровня содержания дороги в целом и сети дорог. С этой целью проводится обследование проверяемых дорог (участков дорог). В процессе обследования на каждом километре фиксируются дефекты содержания дорог по конструктивным элементам, с указанием в необходимых случаях физических размеров, объемов этих дефектов.

После обработки данных обследования по каждому километру, путем группировки зафиксированных дефектов, подсчета в необходимых случаях объемов дефектов, их оценки, устанавливается, какому уровню содержания соответствует факт наличия и величина обнаруженного дефекта.

Таблица 1

Уровень	Характеристика уровня содержания дорог
Допустимый	Содержание дороги обеспечивает допустимый уровень безопасности движения в соответствии с ГОСТ Р 50597-93 «Автомобильные дороги и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям безопасности дорожного движения». Допускаются факты временного ограничения движения автотранспортных средств на отдельных участках по условиям их содержания. ДТП с сопутствующими неудовлетворительными дорожными условиями, зависящими от дефектов содержания дорог, отсутствуют. Допускается наличие не более 15 % (по протяженности) участков с недопустимым уровнем содержания
Средний	Содержание дороги обеспечивает поддержание потребительских свойств автомобильной дороги на среднем уровне. Состояние конструктивных элементов зависящие от содержания не вызывают необходимость временного ограничения движения автотранспортных средств. ДТП с сопутствующими неудовлетворительными дорожными условиями, зависящими от дефектов содержания дорог, отсутствуют. Допускается наличие не более 10 % (по протяженности) участков с недопустимым уровнем содержания
Высокий	Содержание дороги обеспечивает поддержание потребительских свойств автомобильной дороги на максимально возможном уровне, для фактически сложившегося транспортно-эксплуатационного состояния дороги. Автомобильная дорога и каждый ее конструктивный элемент содержится в состоянии, обеспечивающем круглосуточное, бесперебойное и безопасное движение автотранспортных средств. ДТП с сопутствующими неудовлетворительными дорожными условиями, зависящими от дефектов содержания дорог, отсутствуют. Не допускается наличие участков с недопустимым уровнем содержания

При этом, как это показано в табл. 2, выявленным дефектам присваивается оценка в баллах: 2 (два) – недопустимый уровень содержания; 3 (три) – допустимый уровень содержания; 4 (четыре) – средний уровень содержания; 5 (пять) – высокий уровень содержания.

Чтобы получить оценку фактического уровня качества состояния дорог, рекомендуется поступать следующим образом:

- формируются следующие данные:
 - количество обследовано километров – N ;
 - количество километров, на которых зафиксирован недопустимый уровень содержания (оценка 2) – N_2 ;
 - количество километров, на которых зафиксирован допустимый уровень содержания (оценка 3) – N_3 ;
 - количество километров, на которых зафиксирован средний уровень содержания (оценка 4) – N_4 ;
 - количество километров, на которых зафиксирован высокий уровень содержания (оценка 5) – N_5 ; при этом $N_5 = N_1 - N_2 - N_3 - N_4$;
- определяется средняя оценка уровня качества состояния автомобильной дороги или участка дороги:

$$O_{cp} = \frac{N_2 \times 2 + N_3 \times 3 + N_4 \times 4 + N_5 \times 5}{N}.$$

Оценка фактического уровня качества состояния сети дорог производится аналогичным

образом. Таким образом, существует апробированная методическая база для достоверной оценки качества состояния автомобильных дорог.

Оценка аварийности на участках дорог может производиться на основе анализа данных о количестве дорожно-транспортных происшествий (ДТП). Как показывает статистика, из-за неудовлетворительного состояния улиц и дорог за январь–март 2010 года произошло 30,69 % ДТП. Следовательно, учет этого фактора при выборе маршрута движения может существенно повысить уровень безопасности движения по дороге.

Повышенным количеством ДТП и высокой вероятностью появления заторов чаще всего характеризуются следующие участки дорог:

- на которых резко уменьшается скорость движения, преимущественно в связи с недостаточной видимостью и устойчивостью движения; в этом случае при высокой интенсивности и большой скорости движения возможны наезды на впереди идущие транспортные средства и съезды с дороги;
- у которых какой-либо элемент дороги не соответствует скоростям движения, обеспечиваемым другими элементами (скользкое покрытие на кривой большого радиуса, узкий мост на длинном прямом горизонтальном участке, кривая малого радиуса в конце затяжного спуска, сужение дороги, скользкие обочины и т. д.);

в таких местах чаще всего происходит опрокидывание транспортных средств или их съезд с дороги;

- где из-за погодных условий создается несоответствие между скоростями движения на этих участках и на остальной дороге (заниженное земляное полотно там, где часты туманы, гололед; участки дороги, проходящие по северным склонам гор и холмов или около промышленных предприятий, и т. д.);

- где возможны скорости, которые могут превысить безопасные пределы (длинные затяжные спуски на прямых, одиночные кривые малого радиуса на дороге, протрассированной кривыми больших радиусов);

- где у водителя исчезает ориентировка в дальнейшем направлении дороги или возникает неправильное представление о нем (поворот в плане непосредственно за выпуклой кривой,

неожиданный поворот в сторону с примыканием второстепенной дороги по прямому направлению);

- слияния или перекрещивания транспортных потоков на пересечениях дорог, съездах, примыканиях, переходно-скоростных полосах;

- проходящие через малые населенные пункты или расположенные против пунктов обслуживания, автобусных остановок, площадок отдыха и т. д., где имеется возможность неожиданного появления пешеходов и транспортных средств с придорожной полосы;

- где однообразный придорожный ландшафт, план и профиль способствуют потере водителем контроля за скоростью движения или вызывают быстрое утомление и сонливость (длинные прямые участки в степи).

Таблица 2

Оценка дефектов содержания дорог

Элемент дороги	Перечень дефектов, допускаемых при выставлении оценок			
	Оценка	(5)	(4)	(3)
1. Дорожная одежда с покрытием усовершенствованного типа	Дефектов нет	Шелушение, отдельные неровности покрытия, отдельные незаполненные мастикой швы и трещины	Сдвиги, колейность, разрушение кромок проезжей части, граней плит и бордюров, трещины, мусор на проезжей части	Выбоины, проломы; на проезжей части застой воды, грязь, создающие аварийную обстановку при отсутствии соответствующих дорожных знаков
2. Земляное полотно и водоотвод	Дефектов нет	Незначительные нарушения поперечных уклонов обочин; отдельные незаполненные мастикой трещины на обочинах с усовершенствованным покрытием	Выбоины, колейность обочин. Несоблюдение поперечных уклонов обочин; загрязнение полосы отвода	Размывы обочин и откосов, заиливание и застой воды в водоотводных лотках. Кустарник на обочинах. Разрушение водоотводных лотков
3. Искусственные сооружения: мосты, путепроводы, трубы	Содержание проезжей части мостов и путепроводов оценивается аналогично п. 1			
4. Обстановка дороги (организация и безопасность движения)	Дефектов нет	Незначительное загрязнение или повреждение дорожных знаков и разметок, затрудняющие их видимость	Установка знаков и ограждений с нарушениями ГОСТа. Загрязнение, повреждение затрудняющие видимость дорожных ограждений, знаков, направляющих устройств. Наличие неорганизованных съездов, недостаточная освещенность подземных пешеходных переходов	Отсутствие в необходимых местах или значительное разрушение дорожных ограждений при отсутствии соответствующих знаков. Отсутствие (согласно дислокации), загрязнение или повреждение дорожных знаков, исключающее их видимость
5. Благоустройство и озеленение	Дефектов нет	Незначительная загрязненность элементов благоустройства	Мелкие повреждения и отсутствие скамеек, урн в необходимых местах	Антисанитарное состояние, разрушения элементов благоустройства

Для получения сопоставимых данных при оценке аварийности пользуются следующими показателями – коэффициентами относительной аварийности или коэффициентами происшествий.

Для длинных и однородных по геометрическим элементам участков коэффициент происшествий измеряется количеством ДТП на 1 млн автомобиле-километров:

$$K_{\Pi} = \frac{10^6 z}{365LN},$$

где z – количество происшествий в год; N – среднегодовая суточная интенсивность движения в обоих направлениях, принимаемая по данным учета движения, авт/сут; L – длина участка дороги, км.

Для коротких участков, резко отличающихся от смежных (мосты, перекрестки), коэффициент происшествий измеряют количеством ДТП на 1 млн автомобилей (ДТП/1 млн авт.):

$$K_{\Pi} = \frac{10^6 z}{365N}.$$

Коэффициенты, определяемые по этим формулам, могут быть использованы для первичной обработки статистических данных об аварийности отдельных участков. При анализе относительной опасности движения для получения надежной оценки необходимо располагать данными по аварийности не менее чем за 3–5 лет. Для оценки относительной опасности движения по дорогам используются также коэффициенты безопасности, основанные на анализе графика изменения скоростей движения по дороге, и коэффициенты аварийности, основанные на анализе данных статистики ДТП.

Коэффициентами безопасности называют отношение максимальной скорости движения на участке к максимальной скорости въезда автомобилей на этот участок (начальная скорость движения). В свою очередь, коэффициент аварийности представляет собой произведение частных показателей, учитывающих влияние отдельных элементов плана и профиля конкретного участка дороги в сравнении с эталонным участком:

$$K_{\text{ав}} = \prod_{i=1}^R K_i,$$

где K_i – отношение количества ДТП на участке дорог с различными элементами плана и профиля к количеству ДТП на эталонном горизонтальном прямом участке дороги с проезжей частью шириной 7,5 м, шероховатым покрытием и укрепленными обочинами шириной 3,5 м.

Оценка условий дорожного движения включает такие показатели, как интенсивность транспортного потока, наличие линий общественного транспорта (трамвай, троллейбус, автобус), особенности инфраструктуры дорожного движения (наличие и вид пешеходных переходов, путепроводов, транспортных развязок, работа большегрузного транспорта и автомобилей со спецсигналами и т. д.). На основе полученной совокупности оценочных функций можно сформировать комплексный показатель, определяющий уровень безопасности движения по выбранному маршруту. Для этого необходимо осуществить аддитивную свертку предварительно нормированных оценочных функций:

$$\varepsilon_B = c_1 \cdot \varepsilon_1 + c_2 \cdot \varepsilon_2 + c_3 \cdot \varepsilon_3,$$

где весовые коэффициенты назначаются в результате экспертного ранжирования важности перечисленных отдельных составляющих с точки зрения безопасности дорожного движения.

2. АЛГОРИТМ МАРШРУТИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ ВЕКТОРНОГО КРИТЕРИЯ

Дальнейшая процедура маршрутизации представляет собой оптимизацию векторного критерия, в состав которого входят два компонента – критерий дальности ε_A и критерий безопасности ε_B . Для решения задачи векторной оптимизации предлагается следующая последовательность действий.

Процедура поиска оптимального маршрута для заданного участка дорожной сети предусматривает построение ориентированного графа с весами двух видов – в виде расстояний и в виде оценок опасности. В качестве вершин этого графа принимаем всевозможные пересечения транспортных магистралей – дорог, улиц, по которым разрешено движение транспорта, а в качестве ветвей – соответствующие участки транспортных магистралей. На рис. 1 показан пример участка дорожной сети с нанесенным на него ориентированным графом. При этом улицы с двусторонним движением обозначены как неориентированные ветви.

Обозначим через $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ – множество вершин графа, а через $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_M\}$ – множество ветвей. При этом каждая ветвь задается парой вершин графа, которые она соединяет $y_r(x_i; x_j)$. На графе введено отображение $\omega: Y \rightarrow E$, которое каждой ветви $y_r(x_i; x_j)$ ставит в соответствие значение векторного критерия $\{\varepsilon_r^A(x_i; x_j); \varepsilon_r^B(x_i; x_j)\}$.

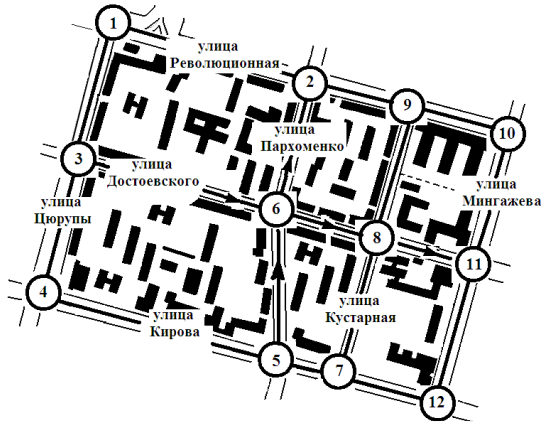


Рис. 1. Граф дорожной сети

Путем или маршрутом из вершины x_a в вершину x_b назовем простую ориентированную цепь, соединяющую последовательность вершин $P = \{x_a, x_q, x_{q+1}, \dots, x_{q+g}, x_b\}$.

Отклонением P_i от пути P в точке x_i назовем путь, совпадающий с P от вершины x_a до вершины x_i , а затем идущий к вершине, отличной от вершины x_{i+1} прежнего пути P . Часть пути P , проходящая через $(i + 1)$ его первых вершин $\{x_a, x_1, x_2, \dots, x_i\}$, называется i -м корнем этого пути R_i , а путь из вершины x_{i+1} в вершину x_b , не совпадающий с соответствующей частью $\{x_{i+1}, x_{i+2}, \dots, x_b\}$ пути P , называется его i -м ответвлением S_i . Длиной пути P назовем величину:

$$L_P = \sum_{(x_i; x_j) \in P} \varepsilon_r^A(x_i; x_j). \quad (1)$$

Аналогично безопасностью пути P назовем величину:

$$V_P = \sum_{(x_i; x_j) \in P} \varepsilon_r^B(x_i; x_j). \quad (2)$$

Кратчайшим путем или путем минимальной длины назовем путь $P(x_a; x_b)$ из вершины x_a в вершину x_b , длина которого удовлетворяет условию:

$$L_P = \min_{P(x_a; x_b)} L_{P(x_a; x_b)}. \quad (3)$$

В свою очередь, кратчайшим путем с δ -уступкой назовем путь $P(x_a; x_b)$, длина которого удовлетворяет условию:

$$L_P \leq \min_{P(x_a; x_b)} L_{P(x_a; x_b)} + \delta. \quad (4)$$

Перейдем теперь к описанию алгоритма поиска маршрута, оптимального по введенному векторному критерию. Данный алгоритм базируется на методе последовательных уступок [2], алгоритмах Дейкстры и Йена поиска кратчайших путей в графе. Суть метода последовательных уступок заключается в том, что вначале на-

ходится маршрут, оптимальный с точки зрения дальности ε_A . Затем назначается допустимое увеличение (уступка) по дальности и находятся все маршруты, дальность которых не превышает дальности кратчайшего маршрута более, чем на величину принятой уступки. Оптимальным по векторному критерию признается тот из найденных маршрутов, которому соответствует максимальная величина критерия безопасности ε_B . При описании алгоритма мы будем использовать следующую совокупность массивов:

L_δ – массив кратчайших путей с δ -уступкой;

L_T – временной массив кратчайших путей;

$M_T = [m(x_i)]_{1 \times N}$ – массив текущих меток вершин графа;

$F = [f(x_i)]_{1 \times N}$ – массив флагов для вершин графа;

$\Gamma(x_i)$ – массив вершин графа, смежных с x_i ;

$\Pi(x_i)$ – массив посещенных вершин графа.

Шаг 1. Присвоение начальных значений $k = 1$, δ , S (здесь S – большое число, удовлетворяющее условию $S \geq \sum_{r=1}^M \varepsilon_r^A(x_i; x_j)$).

Шаг 2. Найти кратчайший путь $P^k(x_a; x_b)$.

Шаг 2.1. Присвоить $m(x_a) = 0$; $f(x_a) = 1$; $m(x_i) = S$; $f(x_i) = 0$, для всех $x_i \neq x_a$; Добавить x_a в массив $\Pi(x_i)$.

Шаг 2.2. Присвоить $x_p = x_a$.

Шаг 2.3. Для всех $x_i \in \Gamma(x_p)$, для которых $f(x_i) = 0$, присвоить

$$m(x_i) = \min[m(x_i), m(x_p) + \varepsilon_r^A(x_p; x_i)].$$

Шаг 2.4. Среди всех вершин, для которых $f(x_i) = 0$, найти вершину с минимальной меткой

$$x_i^* = \arg[\min(m(x_i))].$$

Шаг 2.5. Присвоить $x_p = x_i^*$; $f(x_i^*) = 1$. Добавить x_i^* в массив $\Pi(x_i)$.

Шаг 2.6. Если $x_p \neq x_b$, то идти к шагу 2.3, иначе массив $\Pi(x_i)$ содержит вершины кратчайшего пути $P^k(x_a; x_b)$, длина которого равна $l^* = m(x_b)$, идти к шагу 3.

Шаг 3. Включить кратчайший путь $P^k(x_a; x_b)$ в массив L_δ .

Шаг 4. Присвоить $k = k + 1$.

Шаг 5. Найти все отклонения P_i^k ($k - 1$)-го кратчайшего пути P^{k-1} для всех $i = 1, 2, \dots, g_{k-1}$, выполняя для каждого i шаги с 6-го по 9-й.

Шаг 6. Проверить, совпадает ли i -й корень R_i^{k-1} пути P^{k-1} с аналогичными i -ми корнями R_i^j любого из P^j путей ($j = 1, 2, \dots, k-1$). Если да, то

присвоить $\varepsilon_r^A(x_i^{k-1}; x_{i+1}^j) = S$; иначе ничего не изменять.

Шаг 7. Найти кратчайшие ответвления S_i^k от вершины x_i^{k-1} к x_b , исключая из рассмотрения вершины $x_a, x_1^{k-1}, x_2^{k-1}, \dots, x_i^{k-1}$.

Шаг 7.1. Присвоить $m(x_i^{k-1}) = 0$; $f(x_i^{k-1}) = 1$; $m(x_i) = S$; $f(x_i) = 0$, для всех $x_i \neq x_i^{k-1}$; добавить x_i^{k-1} в массив $\Pi(x_i)$.

Шаг 7.2. Присвоить $x_p = x_i^{k-1}$.

Шаг 7.3. Для всех $x_i \in \Gamma(x_p)$, не принадлежащих к множеству $x_a, x_1^{k-1}, x_2^{k-1}, \dots, x_i^{k-1}$, для которых $f(x_i) = 0$, присвоить

$$m(x_i) = \min[m(x_i), m(x_p) + \varepsilon_r^A(x_p; x_i)]$$

Шаг 7.4. Среди всех вершин, для которых $f(x_i) = 0$, найти вершину с минимальной меткой

$$x_i^* = \arg[\min(m(x_i))].$$

Шаг 7.5. Присвоить $x_p = x_i^*$; $f(x_i^*) = 1$. Добавить x_i^* в массив $\Pi(x_i)$.

Шаг 7.6. Если $x_p \neq x_b$, то идти к шагу 7.3, иначе массив $\Pi(x_i)$ содержит вершины кратчайшего ответвления S_i^k , длина которого равна $m(x_b)$.

Шаг 7.7. Если массив $\Pi(x_i)$ не пустой, то идти к шагу 8, иначе к шагу 12.

Шаг 8. Построить отклонение P_i^k , соединяя i -й корень R_i^k с кратчайшим ответвлением S_i^k и поместить P_i^k в массив M_T .

Шаг 9. Восстановить прежние значения $\varepsilon_r^A(x_i^{k-1}; x_{i+1}^j)$, идти к шагу 6.

Шаг 10. Найти кратчайший путь в массиве M_T . Если длина этого пути удовлетворяет условию

$$l_p \leq l^* + \delta,$$

то обозначить этот путь P^k и поместить его в массив L_δ .

Шаг 11. Идти к шагу 4.

Шаг 12. Для всех $P^k \in L_\delta$ рассчитать показатель безопасности пути:

$$V_{P^k} = \sum_{(x_i; x_j) \in P^k} \varepsilon_r^B(x_i; x_j).$$

Шаг 13. Найти путь с максимальным уровнем безопасности

$$(P^k)_{\text{opt}} = \arg \left[\max_{P^k \in L_\delta} V_{P^k} \right].$$

Шаг 14. Путь $(P^k)_{\text{opt}}$ является искомым маршрутом, оптимальным по введенному векторному критерию.

Предложенный алгоритм требует выполнения порядка $O(N^3)$ операций. Поэтому его реализация на бортовом компьютере становится проблематичной. В связи с этим особую актуальность приобретает задача разработки «облачного» сервера ИТС [3], позволяющего в реальном масштабе времени рассчитывать оптимальные маршруты движения для всех участников дорожного движения.

4. АПРОБАЦИЯ АЛГОРИТМА

Оценим эффективность предложенного алгоритма на примере поиска оптимального маршрута применительно к транспортной сети городского района, изображенной на рис. 1.

Представленный на этом рисунке граф включает 12 вершин и 17 ветвей, которые соответствуют улицам с односторонним и двухсторонним движением. Значения весов ветвей, соответствующих критериям ε_A и ε_B сведены в табл. 3.

Таблица 3

Оценка параметров дорожной структуры

№	Участок дороги	$\varepsilon_A, \text{ м}$	ε_1	ε_2	ε_3	ε_B
1.	1–2	1000	1,000	1,000	0,620	0,962
2.	2–9	900	0,306	0,492	0,417	0,429
3.	9–10	400	0,184	0,472	0,671	0,406
4.	1–3	700	0,255	0,544	0,747	0,478
5.	3–4	500	0,370	0,580	0,367	0,496
6.	3–6	900	0,380	0,270	0,367	0,313
7.	6–8	400	0,194	0,126	0,165	0,150
8.	8–11	450	0,300	0,125	0,290	0,194
9.	4–5	1300	0,560	0,976	0,443	0,798
10.	5–7	100	0,143	0,215	0,241	0,196
11.	7–12	400	0,184	0,376	0,367	0,318
12.	2–6	800	0,360	0,262	0,544	0,320
13.	6–5	1000	0,370	0,297	0,202	0,309
14.	8–7	600	0,245	0,031	0,367	0,129
15.	9–8	750	0,300	0,029	0,544	0,162
16.	10–11	700	0,194	0,147	1,000	0,246
17.	11–12	500	0,194	0,162	0,823	0,238

Необходимо найти оптимальный маршрут из вершины 1 в вершину 12. Вначале находим путь минимальной длины. На рис. 2 показан первый шаг описанного выше алгоритма поис-

ка, а на рис. 3 – завершающий, десятый, шаг с обозначенным маршрутом минимальной длины, который проходит через следующие вершины графа: 1-3-6-8-11-12. Длина этого маршрута составляет $\epsilon_A = 2950$ м, а оценка безопасности – $\epsilon_B = 1,373$.

Осуществляя уступку в 10 % от длины кратчайшего маршрута, проведем аналогичную оптимизацию по критерию безопасности ϵ_B . В нашем примере получается, что найденный ранее маршрут 1-3-6-8-11-12 оказывается оптимальным и по этому критерию. Следовательно, этот маршрут является безусловно лучшим.

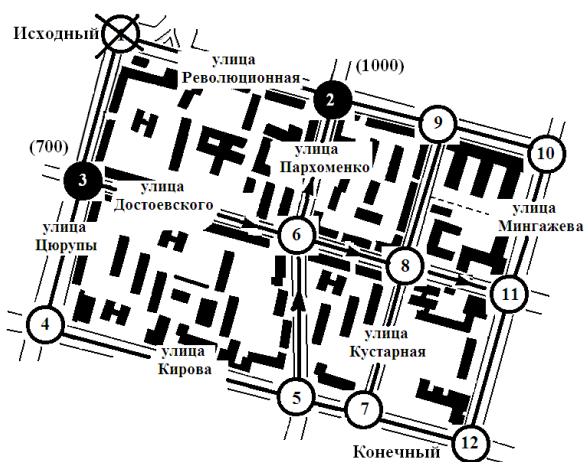


Рис. 2. Процедура поиска оптимального маршрута

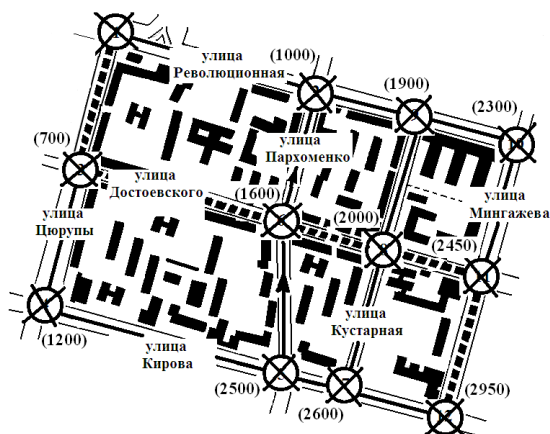


Рис. 3. Результат поиска кратчайшего маршрута

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Использование изложенной методики оптимизации маршрутов движения в ИТС по векторному критерию требует расширение картоновы используемой цифровой карты дополнительными слоями данных, включая возможность для пользователя самостоятельно попол-

нять свои наборы, а также обновлять их в режиме on-line. В число таких наборов могут входить дорожные POI (камеры наблюдения и контроля скорости, лежащие полицейские, опасные участки и др.), объекты специальной автомобильной тематики (автосервисы, шиномонтажи, АЗС) и прочие категории объектов. В последнее время все большее значение приобретает оперативная информация о загруженности автомагистралей – «пробках». Для этого используются технологии беспроводной передачи данных по стандартам мобильного Интернета – IEEE 802.11 (Wi-Fi), IEEE 802.16 (Wireless MAN – WiMAX) и мобильной связи – GPRS. Поскольку баллы, в которых оцениваются «пробки», показывают, насколько уменьшается скорость транспортного потока по сравнению с максимально допустимой для данного участка дороги, то такая информация может оперативно использоваться в предложенном алгоритме путем эквивалентного увеличения длины соответствующего участка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефанов В. Н., Саяпова Л. Р. Телекоммуникационные и интеллектуальные технологии в системах автомобильной навигации // Мир авионики: журнал Национальной ассоциации авиаприборостроителей. 2010. № 4. С. 28–37.
2. Подиновский В. В., Гаврилов В. М. Оптимизация по последовательно применяемым критериям. М.: Советское радио, 1975. 192 с.
3. Ефанов В. Н., Саяпова Л. Р. Принципы формирования телематической платформы для интеллектуальных транспортных систем // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2011. № 9. С. 37–42.

ОБ АВТОРАХ

Ефанов Владимир Николаевич, проф., каф. электроники и биомедицинских технологий. Дипл. инженер электр. техники (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по упр-ю в техн. системах (УГАТУ, 1995). Иссл. в обл. создания интеллектуализированных комплексов бортового оборудования.

Саяпова Линера Радиковна, асс. той же каф. Дипл. инженер по биотехническ. аппаратам и системам (УГАТУ, 2008). Работает над дисс. в обл. системы поддержки принятия решений при формировании маршрутов транспорта с использованием спутниковых навигационных систем.