# ЭВОЛЮЦИОННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРАТЧАЙШЕГО ПУТИ ПРОЕЗДА ПОЖАРНОГО РАСЧЕТА К МЕСТУ ПОЖАРА С ОПТИМИЗИРОВАННЫМ ПРОСТРАНСТВОМ ПОИСКА

**В. Снитюк, А. Джулай**

***Аннотация***: *В статье предложен метод определения кратчайшего пути проезда пожарного автомобиля к месту пожара по критерию минимизации времени с использованием эволюционного моделирования. Исследован алгоритм его реализации на базе полного и оптимизированного пространства поиска возможных решений. Рассмотрены аспекты формирования моделей целевой функции и программной реализации метода. Выполнена экспериментальная верификация и приведены результаты сравнительного анализа с экспертными заключениями.*

***Ключевые слова***: *Неопределенность, эволюционное моделирование*

## Введение

Поиск кратчайшего пути является задачей дискретной оптимизации. При этом определение оптимального пути проезда пожарного автомобиля к месту пожара имеет аспекты, которые выделяют его из общего ряда таких задач. Так, практически, это единственная задача, которая решается в критических условиях, от правильности ее решения зависят человеческие жизни. Верно выбранный маршрут - необходимое условие предотвращения техногенных и экологических катастроф. В условиях дефицита материальных и кадровых ресурсов минимизация времени проезда пожарного расчета является решающим фактором предотвращения негативных последствий пожара. Значительное количество научных исследований посвящено решению этой задачи.

Традиционно предлагают обоснования маршрута выезда пожарного автомобиля, исходя из критерия минимизации времени прибытия личного состава и пожарно-технического вооружения на место пожара. В статье [Пряничников, 1988] выполнен анализ факторов, влияющих на аварийную безопасность дорог: ширины проезжей части, обочины, количества полос движения, радиуса кривизны, видимости, интенсивности транспортных потоков. Предложено определять коэффициент дорожных условий по формуле:

$$D = \left[ \sum_{i=1}^{n} \left( \prod_{j=1}^{m} k_{ij} \right) L_i \right] / L, \qquad (1)$$

где $n$ – количество участков маршрута, $m$ – число факторов, определяющих дорожные условия, $k_{ij}$ – коэффициент важности $j$-го фактора дорожных условий на $i$-м участке маршрута, $L_i$ – длина $i$-го участка, $L$ – общая длина маршрута следования. Выезд пожарного расчета предполагается по маршруту, имеющему наибольшее значение $D$.

Во многих научных публикациях рассматриваются аналогичные подходы. Их недостатком является необходимость рассмотрения фиксированного, желательного полного набора возможных маршрутов, что практически трудно реализуемо. Не предусмотрена возможность варьирования значений важности факторов дорожных условий, что в условиях изменения дорожной обстановки, ремонта дорожного полотна, погодных условий приводит к искажению предполагаемого времени проезда. Необходима разработка адекватной модели времени проезда, как зависимости от значимых факторов, с возможностью ее уточнения и адаптации к изменяющимся внешним условиям.

Важно заметить, что разработка модели времени проезда является необходимым условием определения кратчайшего пути следования к месту пожара. Достаточным условием является метод, который конструктивно позволит определить оптимальный маршрут. Поскольку рассматриваемая задача имеет комбинаторный характер и, как следствие, неизбежной является проблема вычислительной сложности алгоритма, то необходимо предусмотреть реализацию технологии, которая позволит сократить количество анализируемых маршрутов и оптимизировать процесс вычислений.

## Постановка задачи определения оптимального пути проезда пожарного автомобиля

Без ограничения общности будем считать, что структура дорог является прямоугольной (рис. 1). Пронумеруем каждый перекресток в соответствие с центрально-радиальной схемой. Местонахождение пожарного подразделения имеет нулевой номер, наиболее отдаленному "северо-восточному" перекрестку отвечает наибольший номер. Количество перекрестков – $N$. Рассмотренной структуре дорог отвечает матрица расстояний между перекрестками $S = (s_{ij})_{i,j=0}^{N-1}$, где $s_{ij}$ – расстояние от $i$-го к $j$-у перекрестку. Зная среднюю скорость движения пожарного расчета, матрице расстояний можно поставить в соответствие матрицу времени проезда между перекрестками $T = (t_{ij})_{i,j=0}^{N-1}$.

Факторы, влияющие на время проезда, по форме представления их значений можно разделить на три группы: детерминированные, вероятностно-статистические и субъективные.

Минимальное количество перекрестков $K$ на пути прохождения – детерминированный фактор, его возможные значения – натуральные числа, равные номеру квазиконцентрической окружности (см. рис. 1) и увеличивающиеся в меру отдаления перекрестка назначения от местоположения пожарного подраздела. Загруженность дорог $U$ – вероятностно-статистический фактор, который характеризуется статистическим рядом распределения (табл. 1), где в верхней части таблицы находятся временные интервалы, в нижней – относительные частоты количества автомобилей на дороге в этих временных интервалах. Качество дорожного покрытия $V$ является субъективным фактором и определяется функцией принадлежности, которая может быть как непрерывной, так и дискретной. Ее построение осуществляется одним из двух способов, первый из которых базируется на парных сравнениях, выполненных одним экспертом [Ротштейн, 2002], второй – на статистической обработке мнений группы экспертов [Zadeh, 1965].

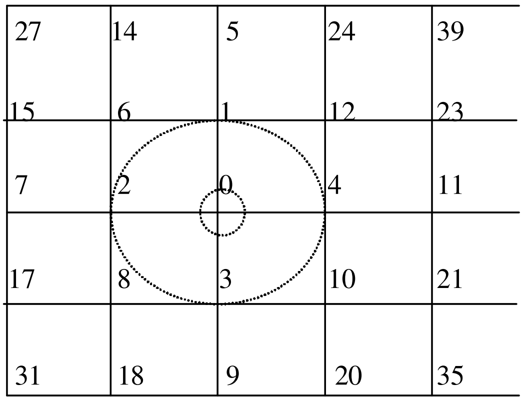

Рис. 1. Центрально-радиальная нумерация перекрестков

Таблица 1

Статистический ряд

| Интервалы | $[t_0, t_1]$ | $[t_1, t_2]$ | ... | $[t_{n-1}, t_n]$ |
|---|---|---|---|---|
| Относительные частоты | $f_1$ | $f_2$ | ... | $f_n$ |

Предположим, что место пожара $H$ находится между двумя перекрестками $n_1$ и $n_2$. Тогда необходимо определить оптимальный маршрут, что отвечает решению задачи [Снитюк, 2004]:

$$\min_t \{L_{on_1} + L_{n_1 H}; L_{on_2} + L_{n_2 H}\} \quad (2)$$

где $L_{ij}$ – маршрут от $i$-го пункта к $j$-у. Исходными данными для решения задачи (2) являются значения элементов матриц $S$; $T$; $K = (k_{ij})_{i=1,\ j=1}^{N\ \ 2}$, где $k_{i1}$ – номер перекрестка назначения, $k_{i2}$ – минимальное количество перекрестков, которое необходимо проехать при прохождении к $k_{i1}$; $G = (g_{ij})_{i=1,\ j=1}^{24\ \ 2}$, где $g_{i1}$ – номер временного интервала (сутки разбиты на 24 промежутка: с 0 часов до 1-го часа (1), с 1-го до 2-го часа (2),...), $g_{i2}$ – относительные частоты количества автомобилей в $g_{i1}$-м временном интервале, $\sum_{i=1}^{24} g_{i2} = 1$; $\sum_{i=1}^{24} g_{i2} = 1$; $Q = (q_{ij})_{i,j=1}^{N}$, где $q_{ij} \in (0,1)$ – коэффициенты, которые определяют качество дорожного покрытия на участке от $i$-го перекрестка к $j$-у. Заметим, что матрица $G$ может иметь не статистическую, а субъективную природу. Если движение в одно и то же время на разных участках дороги является неравномерным, то матрица будет трехмерной, одно из измерений которой будет отвечать номеру участка дороги. В зависимости от особенностей конкретного города или ситуации, количество матриц значений факторов, влияющих на скорость движения пожарного расчета, может быть увеличено. Отметим, что содержательно сущность учета других факторов не будет отличаться от уже рассмотренных.

## Предпосылки решения задачи определения оптимального пути с помощью эволюционного моделирования

Особенности социально-экономического развития стран являются непосредственной причиной роста количества пожаров и, как следствие, гибели людей и нанесения имущественных убытков. Кадровый и материальный дефицит есть, с одной стороны, причиной неэффективного тушения пожаров, а с другой – стимулом к внедрению новых информационно-аналитических технологий, что позволяет повысить эффективность работы пожарных подразделений. Одной из задач, требующих применения интеллектуальных моделей и методов, является минимизация времени проезда пожарного расчета к месту пожара.

Определим исходные предпосылки ее решения. Заметим, что такая задача имеет некоторые общие аспекты с известной задачей коммивояжера. Известно, что точного метода решения данной задачи любой размерности, кроме полного перебора всех вариантов, не существует. Удовлетворительные результаты дают метод ветвей и границ [Luger, 2002; Зайченко, 2000], метод последовательного анализа вариантов [Волкович, 1993], поиск оптимального пути с использованием нейронной сети Хопфилда [Уоссермен, 1992]. Однако посредством последнего метода точный результат получают, примерно, в 50% вычислений, точность первых методов зависит от размерности задачи, высоковероятным также является попадание в локальные оптимумы.

Особенностью задачи поиска оптимального пути пожарного расчета заключаются в том, что наилучшее решение ищется по критерию минимума времени. При этом необходимо учитывать количество перекрестков по пути следования, загруженность дорог (среднее количество автомобилей на дороге в единицу времени), их качество. Учет других факторов также является возможным при их особой значимости и необходимости. Отметим, что технология определения оптимального пути проезда пожарного расчета к месту пожара реализуется с учетом субъективных и статистических факторов. Базовым ее элементом является эволюционный метод определения кратчайшего пути, который заключается в следующем.

Без ограничения общности представим (2) как задачу нахождения

$$\min_{t} L_{0n_t}. \tag{3}$$

Очевидно, что для решения задачи (2) необходимо дважды решить (3) и выполнить некоторые уточнения результата. Поиск оптимального пути будем осуществлять посредством эволюционного алгоритма (ЕА) специального вида, который позволяет находить глобальные оптимумы, в общем случае, недифференцируемых функций. Определим его основные принципы и базовые элементы.

Основным понятием ЕА является *генеральная совокупность* – все множество возможных решений. В нашем случае определим генеральную совокупность как множество векторов $X = (x_0, x_1, x_2, ..., x_k, x_n)$, где $x_0$ – место дислокации пожарного подразделения, $x_n$ – номер перекрестка, ближайшего к месту пожара. Таким образом, значениями элементов вектора $X$ является последовательность номеров перекрестков, которые необходимо проехать для того, чтобы прибыть в $x_n$. Заметим, что количество перекрестков, в общем случае, является переменным. Минимальное значение $k$ определяется номером квазиокружности (см. рис. 1), на котором лежит перекресток $x_n$, максимальное значение может быть достаточно большим. Все $x_i$, $i = \overline{0,k}$ являются разными и ни одно из них не совпадает с $x_n$. На первый взгляд, оптимальнее будут те варианты, у которых $x_i < x_j$ для всех $i < j$, но выполнение такого условия не является обязательным.

## Модель целевой функции

Адекватное применение ЕА связано с превращениями числовых значений из двоичной системы исчисления в десятичную и наоборот. При этом возникает информационная избыточность, поскольку не все двоичные представления имеют свои аналоги в десятичной системе. В общем случае, это приводит к необходимости привлечения дополнительных вычислительных ресурсов и увеличения времени решения задачи [Кисляков 2000, 2001].

Вышеизложенные факты указывают на значительную трудоемкость и нецелесообразность формирования генеральной совокупности. О принадлежности к ней будут свидетельствовать результаты проверки. Важной процедурой является определение выборочной последовательности, которая должна иметь свойство репрезентативности [Goldberg, 1989; Werbos, 1974; Исаев, 2000; Jensen, 2001]. Векторы выборочной последовательности могут иметь разное количество элементов, что связано с количеством перекрестков на пути проезда. Их генерация происходит с учетом содержания матрицы $S$. Первый и последний элементы векторов одинаковы (перекресток, где находится пожарное депо и ближайший перекресток к месту пожара). Другие элементы определяются случайным образом, но с учетом выполнения условия, что из места дислокации пожарного подраздела можно попасть на один из 4-х перекрестков, а из каждого из них – уже на один из трех. Обозначим $P$ – количество элементов в выборочной совокупности.

Для формирования целевой функции (fitness-function) можно применить два подхода. В первом случае необходимо иметь достаточное множество статистических данных, сгруппированных в табл. 2, и осуществить идентификацию зависимости

Таблица 2

Структура исходных данных для идентификации fitness-function

| Длина пути, $L$ | Количество перекрестков, $K$ | № временного интервала, $g$ | Качество дорожного покрытия, $q$ | Время проезда, $T$ |
|---|---|---|---|---|

$$T = F(L, K, g, q), \tag{4}$$

где $T$ – время следования пожарного расчета к месту пожара, $K$ – количество перекрестков, которые он проехал, $g$ – номер временного интервала, $q$ – показатель качества дорожного покрытия, который интегрирует в себе и погодные условия. При правильной формализации задачи осуществить идентификацию (4) несложно. Достаточно предварительно выполнить нормализацию данных и применить метод наименьших квадратов для построения уравнения линейной регрессии [Наконечный, 1997], метод Брандона – для нелинейной регрессии [Чавкин, 2001], методы самоорганизации моделей – для полиномиальных зависимостей (метод группового учета аргументов [Ивахненко, 1975] или метод последовательных упрощений [Васильев, 2001]).

Во втором случае формирования целевой функции происходит эмпирически с использованием взвешивающих и поправочных коэффициентов. При этом используются данные матрицы $T$. Среднее время проезда из $x_0$ в $x_n$ определяется по формуле (по одному из маршрутов):

$$T_{ср.} = \sum_{i=0} \sum_{j \neq i}^{n} t_{ij} \cdot \chi(s_{ij} \neq 0), \tag{5}$$

где $\chi(*)$ – функция-индикатор. Ввиду того, что, в среднем, время прохождения пожарного расчета увеличивается с увеличением количества перекрестков, уточним (5):

$$T = w_1 \cdot k_{n2} \cdot T_{ср}, \tag{6}$$

где $w_1$ – весовой коэффициент, который определяет значимость параметра количества перекрестков. С учетом качества дорожного покрытия целевая функция (5)–(6) является такой:

$$T = w_1 \cdot w_2 \cdot k_{n2} \cdot \sum_{i=0} \sum_{j \neq i}^{n} t_{ij} \cdot q_{ij} \cdot \chi(s_{ij} \neq 0), \tag{7}$$

где $w_2$ – весовой коэффициент, указывающий на важность параметра качества дорожного покрытия. Поскольку в разное время суток длительность прохождения пожарного расчета к месту пожара будет разной, то модель (7) необходимо уточнить:

$$T_v = \frac{\prod_{i=1}^{3} w_i}{g_{t2}} \cdot k_{n2} \cdot \chi(v = g_{t1}) \cdot \sum_{i=0} \sum_{j \neq i}^{n} t_{ij} \cdot q_{ij} \cdot \chi(s_{ij} \neq 0), \tag{8}$$

где $w_3$ – весовой коэффициент важности временных интервалов, $v$ – номер временного интервала.

Сделаем ряд замечаний. Значение функции (8) необходимо рассчитывать в зависимости от времени пожара. Весовые коэффициенты определяются эмпирически экспертами. Таким образом, использование предложенного подхода субъективизировано. Построение функции (4) осуществляется аналитически и, в большинстве случаев, может быть теоретически обосновано. Зависимость (8) получают, исходя из эмпирических умозаключений, и процедура ее верификации является достаточно длительной. Второй подход к получению модели рационально использовать при малой ретроспективе априорных данных.

## Эволюционный метод определения оптимального пути следования пожарного расчета

Учитывая то, что каждая вершина (перекресток) инцидентна только четырем другим вершинам, а их общее количество является достаточно большим (используется при построении матриц $S$ и $T$), применять традиционное бинарное представление элементов вектора совокупности (хромосомы) в классическом ЭА нерационально. Пусть $X_1, X_2, ..., X_p$ – векторы выборочной совокупности (содержат множество перекрестков–маршрутов), упорядоченные по количеству элементов, т.е. $|X_i| \le |X_j|, i < j$. Для каждого из них, рассчитав значение функции (4), получим $T_1, T_2, ..., T_p$.

Используя принцип последовательного преодоления неопределенности, *кроссовер* будем проводить по принципу последовательного отбора [Витковски, 2003; Алгулиев, 2004], в соответствии с которым большую вероятность участия в рекомбинациях имеют векторы с меньшим значением fitness-function. Предположим, что необходимо определить оптимальный маршрут к перекрестку № 39 (см. рис. 1). Для кроссовера выбраны векторы (0, 1, 5, 24, 12, 23, 39) и (0, 1, 12, 4, 11, 23, 39). Определяем, имеются ли одинаковые элементы в этих векторах, кроме первых двух и последнего элемента. Такой элемент – 12, он и является точкой рекомбинации. Осуществив кроссовер, получим два вектора-потомка: (0, 1, 12, 23, 39) и (0, 1, 5, 24, 12, 4, 11, 23, 39). Если одинаковых элементов нет, то один из векторов (с минимальным значением fitness-function) оставляем и случайным образом (с использованием принципа пропорциональности) выбираем другой вектор из выборочной совокупности. Результатом кроссовера будет ноль, один или два вектора. Ноль, если $\exists x_i, x_j : x_i = x_j, i \ne j$ в каждом из векторов; один – если в одном; два, если указанные условия не выполнены ни для одного из векторов-потомков.

Получив $P$ потомков, среди них и среди $P$ родителей выбираем $P$ наилучших векторов. Такой отбор называется элитным. Кроме него, существуют и другие методы отбора: селективный, панмиксия, отбор с вытеснением [Исаев, 2000]. Практическое моделирование засвидетельствовало преимущество именно элитного отбора, поскольку при нем не теряются оптимальные векторы-решения. Из всех видов отбора только для элитного теоретически доказано [Harti, 1990], что итерационный процесс поиска оптимального решения сходится.

Для предотвращения попадания fitness-function в локальный оптимум предусмотрена процедура мутации. Происходит она с вероятностью 0,01 по такой схеме. Разыгрываем случайное равномерно распределенное на множестве $\{1, 2, ..., P\}$ число. Если $\xi = k$, то мутации подлежит $k$-й вектор выборочной совокупности. Если количество элементов в нем равняется $d$, то разыгрывается случайное число $\eta$ на множестве $\{2, 3, ..., d-1\}$. Мутации осуществляются у $\eta = L$ элементов, для чего осуществляется случайный выбор из двух вариантов $(L+1)$-го элемента. Критерием окончания процесса поиска оптимального решения является выполнение одного из следующих условий:

- достижение необходимого значения fitness-function;
- выборочная популяция состоит из одинаковых элементов;
- для любого значения $\varepsilon > 0 : |T_i - T_j| < \varepsilon, \forall i, j, i \ne j$.

Если выполняются первое или третье условие, то решением задачи будет вектор, значение fitness-function которого является наименьшим.

Такой метод имеет свои преимущества перед классическим ЭА и недостатки, связанные с особенностями задачи. Преимуществом является значительное сокращение количества операций, что объясняется неприменением процедуры преобразования чисел в ЭА из десятичной системы счисления в двоичную и наоборот. Десятичное представление оптимизирует процедуру кроссовера за счет уменьшения времени формирования векторов-потомков. В пользу предложенного метода свидетельствует также то, что он не “привязан” к прямоугольной структуре улиц. Если на некоторых из них выполняется ремонт, то в матрицах $S$ и $T$ достаточно на соответствующих местах поставить нули. К недостаткам отнесем проблему формирования выборочной совокупности, что связано с разным количеством элементов у векторов-представителей. Кроме того, процедура определения каждого следующего элемента вектора требует пересмотра строки матрицы расстояний или времени, что при большом количестве перекрестков значительно увеличивает время работы алгоритма.

Предложенная технология ориентирована на то, что соответствующий программный модуль будет работать как в активном, так и в пассивном режимах. В пассивном режиме для каждого временного интервала по известным матрицам количества перекрестков на пути следования пожарного подразделения и качества дорожного покрытия рассчитывается оптимальный маршрут и записывается в базу данных. При пожаре расчету будет выдаваться распоряжение с двумя вариантами маршрутов к смежным перекресткам. При изменении параметров в одной из определяющих матриц или возникновении ситуации, при которой возникает потребность в экстренной выдаче информации о маршруте, которого нет в базе данных, система переводится в активный режим работы и экстренно решает задачу.

В общем случае, решение (8) является локальным оптимумом, поскольку процесс его поиска определяется выбором начальной точки и величины шага поиска. Поэтому возникает необходимость использования эволюционных методов, которые являются инвариантными к такому выбору.

## Технология оптимизации пространства поиска решения задачи

В процессе моделирования выявлено две проблемы. Первая из них заключалась в том, что из каждого перекрестка, обычно, имеются маршруты к четырем других. В то же время, в матрице расстояний, как минимум, на порядок больше вариантов, поэтому возникает значительная вычислительная избыточность. Другая проблема заключается в рациональном представлении хромосом-решений. В частности, априорно невозможно определить, какую длину должна иметь хромосома, количество элементов которой отвечает количеству перекрестков, которые должен проехать пожарный расчет при следовании к месту пожара.

Для решения указанных проблем предлагается такая процедура. В соответствие с рис. 1 и матрицей расстояний строим матрицу $N=(n_{ij})_{i,j=1}^{4\ m}$ (таблицу направлений, в которой показаны перекрестки, смежные фиксированному) и матрицу $L=(l_{ij})_{i,j=1}^{4\ m}$ (таблица расстояний от фиксированного перекрестка к смежным) (табл. 3). Очевидно, что до фиксированного перекрестка существует большое количество пу-

Таблица 3

Таблица направлений

| Перекресток | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Налево | 2 | 6 | 7 | 8 | 0 | 14 | 15 | * | 17 | 18 | 3 | 4 | 1 |
| Прямо | 1 | 5 | 6 | 0 | 12 | * | 14 | 15 | 2 | 3 | 4 | 23 | 24 |
| Направо | 4 | 12 | 0 | 10 | 11 | 24 | 1 | 6 | 3 | 20 | 21 | * | 23 |
| Назад | 3 | 0 | 8 | 9 | 10 | 1 | 2 | 17 | 18 | * | 20 | 21 | 4 |
| Таблица расстояний между перекрестками | | | | | | | | | | | | | |
| Перекресток | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Налево | 1 | 3 | 3 | 5 | 6 | 3 | 2 | * | 3 | 2 | 4 | 4 | 2 |
| Прямо | 9 | 1 | 1 | 3 | 7 | * | 2 | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| Направо | 6 | 2 | 1 | 4 | 4 | 2 | 3 | 3 | 5 | 1 | 2 | * | 3 |
| Назад | 3 | 9 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | * | 2 | 3 | 7 |

тей, каждый из которых проходит через разное количество промежуточных перекрестков. Минимальное количество таких перекрестков определяется номером квазиконцентрической окружности, проходящей через финальный перекресток. Максимальное количество перекрестков определяется экспертным путем и, чаще всего, не превышает тройного количества минимальных перекрестков в критических случаях, и двойного – в штатных ситуациях.

Определим в качестве конечного перекресток № 39 (см. рис. 1). Он принадлежит четвертой окружности, поэтому наименьшая длина хромосомы равняется четырем и она будет такой:

| | | | |
|---|---|---|---|
| $x(1)$ | $x(2)$ | $x(3)$ | $x(4)$ |

В хромосоме $x(1)=0$ стартовая точка (депо), $x(4)=39$ – конечная точка. Максимальную длину хромосомы положим равной восьми. Параллельно с выполнением традиционных операций ЭА, в предложенной процедуре необходимо придерживаться таких шагов. При инициализации выборочной популяции обеспечить равномерное представительство хромосом разной длины. Для этого разыгрываем случайное равномерно распределенное целое число из множества {4, 5, 6, 7, 8}, которое отвечает длине хромосомы. Если это число 4, то первый и последний ее фрагмент уже известны. Вспомогательная хромосома состоит из четырех генов. Первые два гена кодируют направление движения из $x(1)$ (соответственно: 00 – налево, 01 – прямо, 10 – направо, 11 – назад), другие два – из $x(4)$. На допустимость решения указывает выполнение ограничения, которое определяет то, что перекрестки $x(2)$ и $x(3)$ являются соседними. Для хромосом с большей длиной такая процедура выполняется рекурсивно.

## Анализ результатов моделирования

Время экспериментального моделирования без выполнения процедуры сужения пространства поиска на компьютере Pentium 2,0 GHz составило, в среднем, 12-16 минут. Если же в алгоритме поиска выполняется вспомогательная процедура, то время поиска оптимального решения за счет сокращения неверных шагов уменьшилось до 0,8-1,1 минут. Если целевой функцией является зависимость (8) с предварительно установленными экспертным путем весовыми коэффициентами, то время проезда к месту пожара по маршруту, определенному посредством моделирования, на 7-10% является меньшим, чем время, которое отвечает маршруту, предложенному экспертами (начальниками боевых расчетов) или совпадает. Верификация этого факта достигается вычислением целевой функции по двум предложенным маршрутам при постоянных значениях весовых коэффициентов, определяющих особенность проезда.

## Заключение

Метод определения кратчайшего пути следования пожарного расчета к месту пожара с оптимизацией пространства поиска является технологией, позволяющей избежать человеческих жертв и сократить материальный ущерб. Его эффективное применение предполагает наличие информационной базы, содержащей данные о количестве перекрестков, состоянии дорог и дорожной обстановке, а также ее обновление в режиме реального времени. Увеличивающееся количество “пробок” на дорогах подчеркивает актуальность предложенного метода. Изменение информации предполагает пересчет оптимального маршрута.

Вычислительная сложность эволюционных алгоритмов обосновывает необходимость разработки методов, направленных на увеличение скорости расчетов при неизменной точности. Потому перспективным представляется разработка оптимизированных моделей целевых функций, процедур уменьшения информационной избыточности начальных данных. Важно заметить, что предложенные модели обладают свойством открытости, т.е. допускают учет и других значимых факторов, а весовые коэффициенты целесообразно разделить на локальные (характеризующие участки дорог) и глобальные, являющиеся атрибутами дорожной ситуации в целом.

## Библиография

[Пряничников, 1988] В.А. Пряничников, В.В. Роенко. Критерий выбора маршрутов следования пожарных автомобилей // Организация работ по профилактике и тушению пожаров: Сб. научн. тр. – Москва: ВНИИПО, 1988. – С. 89-92.

[Ротштейн, 2002] А.П. Ротштейн. Влияние методов дефаззификации на скорость настройки нечеткой модели // Кибернетика и системный анализ. – 2002. – № 1. – с. 34-45.

[Zadeh, 1965] L. Zadeh. Fuzzy sets // Information and control. – 1965. – № 8. – P. 338-353.

[Снитюк, 2004] В.Е. Снитюк, А.Н. Джулай. Интеллектуальная технология оптимизации пути следования пожарного расчета к месту пожара // АСУ и приборы автоматики. – 2004. – Вып. 129. – С. 41-46.

[Luger, 2002] G.F. Luger. Artificial intelligence. Structures and strategies for complex problem solving. – Addison Wesley: Boston, 2002. – 864 p.

[Зайченко, 2000] Ю.П. Зайченко. Исследование операций. – Киев: Випол, 2000. – 688 с.

[Волкович, 1993] В.Л. Волкович, А.Ф.Волошин, В.А. Заславский, И.А. Ушаков. Модели и методы оптимизации надежности сложных систем. – Киев: Наукова думка, 1993. – 312 с.

[Уоссермен, 1992] Ф. Уоссермен. – Нейрокомпьютерная техника: теория и практика. – Москва: Юнити, 1992. – 240 с.

[Кисляков, 2000] А.В. Кисляков. Генетические алгоритмы: математический анализ некоторых схем репродукции // Информационные технологии. – 2000. – № 12. – С. 9-14.

[Кисляков, 2001] А.В. Кисляков. Генетические алгоритмы: операторы скрещивания и мутации репродукции // Информационные технологии. – 2001. – № 1. – С. 29-34.
[Goldberg, 1989] D.E. Goldberg. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. – Addison wesley, 1989.– 196 p.
[Werbos, 1974] P. Werbos. Beyond regression: new tools for prediction and analysis in the behavioral sciences. – PhD thesis: Harvard university, 1974. – 240 p.
[Исаев, 2000] С.А. Исаев. Разработка и исследование генетических алгоритмов для принятия решений на основе многокритериальных нелинейных моделей: Автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.13.17 / Нижегородск. гос. унив. – Нижний Новгород. – 2000. – 18 с.
[Jensen, 2001] Mikkel. T. Jensen. Robust and flexible scheduling with evolutionary computation // phd thesis. – University of Aarhus, Denmark. – 2001. – 299 pp.
[Наконечный, 1997] С.И. Наконечный, Т.О. Терещенко, Т.П. Романюк. Эконометрия. – Киев: КНЭУ, 1997. – 352 с.
[Чавкин, 2001] А.М. Чавкин. Методы и модели рационального управления в рыночной экономике. – Москва: Финансы и статистика, 2001. – 320 с.
[Ивахненко, 1975] А.Г. Ивахненко. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. – Киев: Техника, 1975. – 312 с.
[Васильев, 2001] В.И. Васильев. Взаимозаменяемость метода группового учета аргументов (МГУА) и метода предельных упрощений (МПУ) // Искусственный интеллект. – 2001. – № 1. – С. 29–42.
[Витковски, 2003] Т. Витковски, С. Эльзвай, А. Антчак. Проектирование основных операций генетических алгоритмов для планирования производства // Проблемы управления и информатики. – 2003. – № 6. – С. 129-138.
[Алгулиев, 2004] Р.М. Алгулиев, Р.М. Алыгулиев. Генетический подход к оптимальному назначению заданий в распределенной системе // Искусственный интеллект. – 2004. – № 4. – С. 79-88.
[Harti, 1990] R.E. Harti. A global convergence proof for class of genetic algorithms. – Wien: Technische Universitaet, 1990. – 136 p.

## Информация об авторах

**Виталий Снитюк –** Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, докторант факультета кибернетики; пр. Акад. Глушкова 2, стр. 6, Киев, Украина; e-mail: svit@majar.com

**Александр Джулай** – Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля, старший преподаватель; ул. Оноприенко, 8, Черкассы, Украина; e-mail: djulaj@ukr.net