

УДК 004.896.001.63

*В.Е. СНИТЮК, А.Н. ДЖУЛАЙ*

## **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПУТИ СЛЕДОВАНИЯ ПОЖАРНОГО РАСЧЕТА К МЕСТУ ПОЖАРА**

Рассмотрена и формализована задача оптимизации пути следования пожарного расчета к месту пожара. Предложено эволюционный метод определения кратчайшего пути, базирующийся основных понятиях и методологии генетического программирования. Определены целевые функции поиска оптимального решения, разработаны формальные представления базовых структурных единиц и предложены критерии окончания итерационного процесса.

### **1. Введение**

Сложная социально-экономическая ситуация в Украине является непосредственной причиной возрастания количества пожаров и, как следствие, гибели людей и нанесения имущественного ущерба. Кадровый и материальный дефицит является с одной стороны причиной неэффективного тушения пожаров, а с другой – стимулом к внедрению новых информационных технологий, позволяющих повысить эффективность работы пожарных подразделений. Одной из таких задач, требующих применения интеллектуальных моделей и методов, является оптимизация времени проезда пожарного расчета к месту пожара.

### **2. Исходные предпосылки исследования.**

Указанная задача имеет аспекты родственные известной задаче коммивояжера. Известно, что более точного метода решения данной задачи, кроме полного перебора всех вариантов, не существует. Удовлетворительные результаты дают метод ветвей и границ, метод последовательного анализа вариантов [1], поиск оптимального пути с помощью нейронной сети Хопфилда [2]. Однако с помощью последнего метода оптимальный результат получают лишь в 50% вычислений, точность первых методов также невысокая, что связано с нахождением локальных оптимумов.

Особенности задачи поиска оптимального пути пожарного расчета заключаются в том, что наилучшее решение ищется по критерию минимума времени. При этом необходимо учитывать количество перекрестков на пути следования, загруженность дорог (среднее число автомобилей в единицу времени), их качество. Учет других факторов возможен при их особой значимости и необходимости. Целью настоящей статьи является изложение технологии определения оптимального пути проезда пожарного расчета к месту пожара с учетом субъективно-статистических факторов.

### **3. Формализованная постановка задачи.**

Предположим, без ограничения общности, что структура дорог является прямоугольной (рис.1). Пронумеруем каждый перекресток согласно центрально-радиальной схемы. Пожарное подразделение имеет нулевой номер, чем дальше перекресток удален от его расположения, тем больший у него номер. Количество перекрестков -  $N$ . Рассмотренной структуре дорог соответствует матрица расстояний между перекрестками  $S = (s_{ij})_{i,j=0}^{N-1}$ ,

где  $s_{ij}$  - расстояние от  $i$ -го до  $j$ -го перекрестка. Зная среднюю скорость пожарного расчета, матрице расстояний можно поставить в соответствие матрицу времени проезда между перекрестками  $T = (t_{ij})_{i,j=0}^{N-1}$ .

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

Минимальное количество перекрестков  $K$  на пути следования – детерминированный фактор, его значения – натуральные числа, равные номеру квазицентрической окружности (см. рис.1) и возрастающие по мере удаления перекрестка назначения от месторасположения пожарного подразделения. Загруженность дорог  $Z$  – вероятностно-статистический фактор, характеризующийся статистическим рядом распределения (табл.1), где в верхней части таблицы находятся временные интервалы, в нижней – относительные частоты количества автомобилей в этих временных интервалах. Качество дорожного покрытия  $Q$  является субъективным фактором и определяется функцией принадлежности, которая может быть как непрерывной, так и дискретной. Ее построение осуществляется одним из двух способов. Первый базируется на парных сравнениях [3], выполненных одним экспертом, второй – на статистической обработке мнений группы экспертов [4].

|    |    |   |    |    |
|----|----|---|----|----|
| 27 | 14 | 5 | 24 | 39 |
| 15 | 6  | 1 | 12 | 23 |
| 7  | 2  | 0 | 4  | 11 |
| 17 | 8  | 3 | 10 | 21 |
| 31 | 18 | 9 | 20 | 35 |

Рис. 1. Центральнo-радиальная нумерация перекрестков

Таблица 1

| Статистический ряд |              |              |     |                    |
|--------------------|--------------|--------------|-----|--------------------|
| Интервалы          | $[t_0, t_1]$ | $[t_1, t_2]$ | ... | $[t_{23}, t_{24}]$ |
| Отн. частоты       | $f_1$        | $f_2$        | ... | $f_{24}$           |

Предположим, что место пожара  $Z$  находится между двумя перекрестками  $n_1$  и  $n_2$ . Тогда необходимо определить оптимальный маршрут, соответствующий решению задачи нахождения

$$\min_t \{L_{on_1} + L_{n_1 z}; L_{on_2} + L_{n_2 z}\}, \quad (1)$$

где  $L_{ij}$  - маршрут от  $i$ -го пункта до  $j$ -го.

Исходными данными для решения задачи (1) являются матрицы  $S, T$ ;  $K = (k_{ij})_{i=1, j=1}^N, 2$ , где  $k_{i1}$  - номер перекрестка назначения,  $k_{i2}$  - минимальное количество перекрестков, которое надо пересекать при следовании 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 часу (1), с 1 часу до 2 часов (2),...),  $g_{i2}$  - относительные частоты количества автомобилей в  $g_{i1}$ -м временном интервале,  $\sum_{i=1}^{24} g_{i2} = 1$ ;  $Q = (q_{ij})_{i,j=1}^N$ , где  $q_{ij} \in (0,1)$  - коэффициенты, определяющие качество дорожного покрытия от  $i$ -го перекрестка к  $j$ -му. 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  $G$  будет трехмерной, одно из измерений которой отвечает участку дороги. В зависимости от особенностей конкретного города или ситуации, количество матриц значений факторов, оказывающих влияние на скорость движения пожарного расчета, может быть увеличено. Однако заметим, что сущность учета других факторов не будет отличаться от уже рассмотренных.

#### 4. Эволюционный метод определения кратчайшего пути.

Упростим задачу (1) и будем находить решение задачи поиска

$$\min_t L_{0n_1} \quad (2)$$

Очевидно, что для решения (1) необходимо дважды решить (2) и выполнить некоторые уточнения результата. Поиск оптимального пути будем осуществлять с помощью эволюционного алгоритма (ЭА) специального вида, позволяющего находить глобальные оптимумы недифференцируемых функций. ЭА является типичным представителем методов эволюционного моделирования [5].

*Генеральная совокупность.* Базовым понятием ЭА является генеральная совокупность – все множество возможных решений. В нашем случае определим генеральную совокупность как множество векторов  $X = (x_0, x_1, x_2, \dots, x_k, x_n)$ , где  $x_0$  - место дислокации пожарного подразделения,  $x_n$  - номер перекрестка, ближайшего к месту пожара. Таким образом, значения элементов вектора  $X$  является последовательность номеров перекрестков, которые необходимо проехать для попадания в  $x_n$ . Заметим, что количество перекрестков является переменным. Минимальное значение  $k$  определяется номером квазиокружности, на которой 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  $x_n$ . Более предпочтительными являются также те варианты, в которых  $x_i < x_j$  для всех  $i < j$ , но выполнение такого условия не является обязательным.

*Выборочная совокупность.* Вышеизложенные факты указывают на нецелесообразность формирования генеральной совокупности. О принадлежности к ней будут свидетельствовать результаты проверки. Важной процедурой является определение выборочной последовательности, обладающей свойством репрезентативности. Каждый ее вектор является составляющей множества  $X$ . Выборочные векторы могут иметь различное количество элементов, что связано с количеством перекрестков на пути следования. Их генерация происходит по матрице  $S$ . Первый и последний элементы векторов одинаковы. Остальные элементы определяются случайным образом, но при выполнении условия, что из места дислокации пожарного подразделения можно попасть на один из 4-х перекрестков, а из любого из них - уже на один из трех. Предположим, что количество элементов выборочной совокупности  $P$ .

*Целевая функция (fitness function).* Для формирования целевой функции можно применить два подхода. В первом случае необходимо иметь достаточное количество статистических данных в виде табл. 2. и осуществить идентификацию зависимости

Таблица 2

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

$$T = F(L, K, g, q), \quad (3)$$

где  $T$  - время следования пожарного расчета к месту пожара,  $K$  - количество перекрестков, которое он проехал,  $g$  - номер временного интервала,  $q$  - показатель качества дорожного покрытия, интегрирующий в себе и погодные условия. При правильной формализации осуществить идентификацию (3) несложно, выполнив предварительно нормализацию данных и применив метод наименьших квадратов для построения уравнения линейной регрессии [6], метод Брандона – для нелинейной регрессии [7], методы самоорганизации

Снитюк В.Е. Джулай О.М. Интеллектуальная технология оптимизации пути следования пожарного расчета к месту пожара

моделей – для полиномиальных зависимостей (метод группового учета аргументов [8] и метод последовательных упрощений [9]).

Во втором случае формирование целевой функции происходит эмпирически с использованием весовых 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):

$$T_{cp.} = \sum_{i=0}^n \sum_{j \neq i} t_{ij} \cdot \chi(s_{ij} \neq 0), \quad (4)$$

где  $\chi(*)$  - функция-индикатор. Учитывая, что, в среднем, время следования пожарного расчета увеличивается с увеличением минимального количества перекрестков, уточним (4)

$$T = w_1 \cdot k_{n2} \cdot T_{cp.}, \quad (5)$$

где  $w_1$  - весовой коэффициент, определяющий важность параметра количества перекрестков. С учетом качества дорожного покрытия целевая функция (4)-(5) имеет вид:

$$T = w_1 \cdot w_2 \cdot k_{n2} \cdot \sum_{i=0}^n \sum_{j \neq i} t_{ij} \cdot q_{ij} \cdot \chi(s_{ij} \neq 0), \quad (6)$$

где  $w_2$  - весовой коэффициент, указывающий на важность параметра качества дорожного покрытия. Поскольку в разное время суток длительность следования пожарного расчета к месту пожара будет различной, то формулу (6) необходимо модифицировать

$$T_v = \frac{\prod_{i=1}^3 w_i}{g_{t2}} \cdot q_{n2} \cdot \chi(v = g_{t1}) \cdot \sum_{i=0}^n \sum_{j \neq i} t_{ij} \cdot q_{ij} \cdot \chi(s_{ij} \neq 0), \quad (7)$$

где  $w_3$  - весовой коэффициент важности временных интервалов.

Сделаем ряд замечаний. Значения функции (7) должны рассчитываться в зависимости от времени пожара. Весовые коэффициенты определяются эмпирично. Таким образом, использование предложенных подходов имеет свои недостатки. Построение функции (3) осуществляется аналитически и может быть теоретически обосновано. Функцию (7) получают, в большинстве случаев, исходя из эмпирических соображений, и процедура ее верификации является достаточно длительной. Ее рационально использовать при малой ретроспективе априорных данных. В дальнейшем будем полагать, что (3) и есть *fitness function*.

*Хромосомы и генетические операторы.* Учитывая, что каждая вершина (перекресток) инцидентна только четырем другим вершинам, а их общее количество является достаточно большим (используется при построении матриц  $S$  и  $T$ ), использовать традиционное бинарное представление элементов вектора из выборочной совокупности нерационально. Пусть  $X_1, X_2, \dots, X_p$  - векторы выборочной совокупности, упорядоченные по количеству элементов в них, т.е.  $|X_i| \leq |X_j|, i < j$ . Для каждого из них рассчитаем значение функции (3), получим  $T_1, T_2, \dots, T_p$ .

Используя принцип последовательного преодоления неопределенности, кроссовер будем проводить по принципу последовательного отбора [10], согласно которому большую вероятность участия имеют векторы с меньшим значением *fitness function*. Предположим, что необходимо определить оптимальный маршрут до перекрестка №39 (см. рис.1). Для кроссовера выбраны векторы (0, 1, 5, 24, 12, 23, 39) и (0, 1, 12, 4, 11, 23, 39). Определяем, есть ли одинаковые элементы в этих векторах, кроме первых двух и последнего. Такой

элемент – 12, он и является точкой деления. Осуществив кроссовер, получим два векторы-потомки: (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 из выборочной совокупности. Результатом кроссовера может быть ноль, один или два векторы. Ноль, если  $\exists x_i, x_j : x_i = x_j, i \neq j$  в каждом из векторов, один, - если в одном, два, если указанные условия не имеют места ни в одном из векторов-потомков.

После получения  $P$  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 [10]. Практическое моделирование засвидетельствовало преимущество именно элитного отбора, поскольку при нем не теряются оптимальные векторы-решения.

Для предотвращения попадания в локальный оптимум предусмотрена процедура мутации. Происходит она с вероятностью 0,01 по следующей схеме. Разыгрываем случайное число  $\xi$  с равномерным распределением на множестве  $\{1, 2, \dots, P\}$ . Если  $\xi = k$ , то мутации подвергается  $k$ -й вектор выборочной совокупности. Если количество элементов в нем равно  $d$ , то разыгрывается случайное число  $\eta$  на множестве  $\{2, 3, \dots, d-1\}$ . Мутации подвергаются  $\eta = L$  элементов, для чего осуществляется случайный выбор из двух оставшихся вариантов  $(L+1)$ -го элемента и случайным образом рассчитывается “хвост” вектора-представителя.

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 указанного  $\varepsilon > 0 : |T_i - T_j| < \varepsilon, \forall i, j, i \neq j$ .

Если выполняется первое или третье условия, то решением задачи является вектор, значение fitness function которого является наименьшим.

Разработанная технология имеет свои преимущества перед классическим генетическим алгоритмом и недостатки, которые связаны с особенностями задачи. Преимуществом является значительное сокращение количества операций, связанных с преобразованием чисел в генетическом алгоритме 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 производится ремонт, то в матрицах  $S$  и  $T$  достаточно на соответствующих местах поставить нули. К недостаткам отнесем проблему формирования выборочной совокупности, которая связана с различным размером векторов-представителей. Кроме того, процедура определения каждого следующего элемента вектора предполагает просмотр строки матрицы расстояний или времени, что при большом количестве перекрестков значительно увеличивает время работы алгоритма.

Предложенная технология реализована как составляющая часть информационно-аналитической системы “БЕЗПЕКА”, внедряемой в пожарных подразделениях Черкасского региона и не имеющей аналогов в Украине. Предполагается, что соответствующий 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 и качества дорожного покрытия будет рассчитываться оптимальный

## Снитюк В.Е. Джулай О.М. Интеллектуальная технология оптимизации пути следования пожарного расчета к месту пожара

маршрут для каждого перекрестка и записываться в базу данных. При указании места пожара пожарному расчету будет выдаваться предписание с двумя вариантами маршрутов к соседним перекресткам. При изменении параметров в одной из определяющих матриц или возникновении ситуации в экстренной выдаче информации о маршруте, которого нет в базе данных, система переводится в активный режим работы и решает первоочередную задачу.

Тестирование системы проводилось для структуры улиц, изображенной на рис.1. Конечным пунктом проезда определен перекресток № 39. В выборочную популяцию определено 10 векторов-представителей. После седьмой итерации процесс поиска оптимального решения сошелся, что потребовало 150 вычислений целевой функции – наиболее ресурсозатратной процедуры. Вариант с использованием полного перебора вариантов потребовал такого количества вычислений, которое на несколько порядков больше предыдущего варианта.

### 5. Выводы.

Разработанная интеллектуальная технология решения задачи определения оптимального маршрута следования пожарного расчета к месту пожара является востребованной в условиях, когда среднее время пожара, при котором наносится основной ущерб, составляет несколько минут. Ее внедрение позволит существенно повысить эффективность работы пожарных подразделений, поскольку интеграция объективных и субъективных факторов направлена на повышения уровня объективизации пожарной ситуации при принятии решений и решение одной из задач информационно-аналитического сопровождения работы пожарных подразделений. Нерешенной остается проблема оптимизации предложенного метода, связанная с уменьшением времени формирования векторов-представителей выборочной совокупности, являющихся базовыми опорными решениями рассматриваемой задачи.

**Список літератури:** 1. *Моделі і методи оптимізації надійності складних систем* / Волкович В.Л., Волошин А.Ф., Заславський В.А., Ушаков І.А.; Под ред. Михалеви́ча В.С.; АН України, Ін-т кібернетики ім. В.М. Глушкова. – К.: Наук. думка, 1993. – 312с. 2. *Уоссермен Ф.* Нейрокомпьютерная техника: теория и практика. – М.: Мир, 1992. – 190с. 3. *Ротштейн А.П.* Влияние методов дефаззификации на скорость настройки нечеткой модели // Кибернетика и системный анализ. – 2002. - № 1. 4. *Zadeh L.* Fuzzy sets // Information and Control. – 1965. - № 8. – P. 338-353. 5. *Holland J. H.* Adaptation in natural and artificial systems. An introductory analysis with application to biology, control and artificial intelligence. – London: Bradford book edition, 1994. – 211 p. 6. *Наконечний С.І., Терещенко Т.О., Романюк Т.П.* Економетрія. – К.:КНЕУ, 1997. – 352с. 7. *Чавкин А.М.* Методы и модели рационального управления в рыночной экономике. – М.: Финансы и статистика, 2001. – 320с. 8. *Ивахненко А.Г., Юрачковский Ю.П.* Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. – М.: Радио и связь, 1987. – 120с. 9. *Васильев В.И.* Взаимозаменяемость метода группового учета аргументов (МГУА) и метода предельных упрощений (МПУ) // Штучний інтелект. – №1. – 2001. – С.29–42. 10. *Исаев С.А.* Разработка и исследование генетических алгоритмов для принятия решений на основе многокритериальных нелинейных моделей / Автореф. дисс. к.т.н. – Н. Новгород: НГУ, 2000. – 18с.

Поступила в редколлегию 00.00.00

**Снитюк Виталий Евгеньевич**, кандидат технических наук, доцент, докторант Киевского национального университета им. Тараса Шевченко. Научные интересы: эволюционное моделирование, биокибернетическая оптимизация, системное проектирование. Адрес, контактные телефоны: бул. Шевченко, 460, Черкассы, Украина, 18006. Тел.: (0472) 43-38-97.

**Джулай Александр Николаевич**, адъюнкт кафедры пожарной техники Черкасского института пожарной безопасности им. Героев Чернобыля. Научные интересы: системное проектирование, информационно-аналитические системы. Адрес, контактные телефоны: ул. Оноприенка 8, Черкассы, Украина, 18034. Тел.: (0472) 65-74-54.

Снитюк В.Е. Джулай О.М. Интеллектуальная технология оптимизации пути следования пожарного расчета к месту пожара

УДК 004.896.001.63

**Інтелектуальна технологія оптимізації шляху руху пожежного розрахунку до місця пожежі** / В.Є. Снитюк, О.М. Джулай // АСУ та прилади автоматики. 2004. Вип. 00. С. 000-000.

Наведено результати теоретичних та практичних досліджень із розробки інтелектуальної технології визначення оптимального за критерієм часу шляху руху пожежного розрахунку до місця пожежі. Виконано формалізовану постановку задачі, розроблені основні структурні одиниці технології, запропоновано цільові функції та критерії закінчення ітераційного процесу пошуку розв'язку задачі. Табл. 2. Іл. 2. Бібліогр.: 9 назв.

**Intellectual process engineering of path driving optimization of the fire account to a fire place** / V.E. Snytyuk, O.M. Djulay // Management Information System and Devices. All-Ukr. Sci. Interdep. Mag. 2004. № 00. P. 000-000.

The outcomes of theoretical and practical researches on development of an intellectual process engineering of the definition optimum on time criterion of driving path of the fire account in a fire place are reduced. The formalized statement of the task is carried out, basic structural units of a process engineering are developed, the goal functions and criterions of iterative process termination of solution searching are offered. Tab. 00. Fig 00. Ref.: 00 items.