

Д.В. Тараканов

(Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России;
e-mail: den-pgs@yandex.ru)

МЕТОД МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА МАРШРУТОВ ДВИЖЕНИЯ ПОЖАРНЫХ В ЗДАНИЯХ ПРИ ТУШЕНИИ ПОЖАРОВ

Произведена многокритериальная постановка задачи о выборе маршрутов движения пожарных внутри здания и разработан метод её решения.

Ключевые слова: многокритериальный анализ, пожар, здание.

D.V. Tarakanov

MULTI-CRITERIA CHOICE METHOD OF THE MOVEMENT FIREFIGHTERS IN BUILDINGS DURING FIRE EXTINGUISHING

Produced multicriteria formulation of the problem of choosing the path of movement of firefighters inside the building and developed a method to solve it.

Key words: multi-criteria analysis, fire, building.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 29 июля 2016 г.

Введение

Ежегодно при пожарах в России погибнет десятки тысяч человек, а материальный ущерб от пожаров составляет десятки миллиардов рублей в год. При этом Россия занимает "лидирующие" позиции, в сравнении с другими странами мира по травматизму и гибели людей при пожарах (в пересчёте на один миллион человек). Половина материального ущерба от пожаров приходится на крупные пожары, хотя их количество невелико и составляет не более 0,05 % от общего числа пожаров.

Большинство крупных пожаров происходит в зданиях. Процесс ликвидации пожаров внутри зданий представляет собой особую опасность для пожарных. По статистическим данным, гибель пожарных при тушении пожаров в большинстве случаев происходит внутри зданий вследствие воздействия опасных факторов пожара. Поэтому умение оперативно и правильно оценивать динамику опасных факторов пожара, а также свои возможности по пожаротушению внутри зданий является одним из факторов повышения эффективности тушения пожаров в зданиях и гарантией безопасного ведения действий по тушению пожара [1].

При ликвидации пожаров в зданиях оперативность управления носит определяющий характер. Временем лимитируются не только масштабы пожара, но и эффективность тушения пожара внутри здания, которая намного превосходит эффективность тушения пожара снаружи здания [2].

При тушении пожаров в зданиях руководителю тушения пожара необходимо знать, где происходит пожар в здании, каковы его размеры и каким образом можно прибыть к месту пожара, обеспечивая наилучшие условия для его ликвидации. Место и масштабы пожара в здании определяются современными системами мониторинга, однако выбор маршрута движения к очагу пожара представляет собой сложную нетривиальную задачу, для решения которой необходимо использовать формализованные процедуры [3].

Современные системы поддержки управления позволяют обеспечить руководителя тушения пожара необходимой информацией для принятия решений. Однако, избыточность и противоречивость информации существенно снижает оперативность управления [4]. В случае задачи выбора маршрутов избыточность информации заключается в наличии большого количества маршрутов движения, а противоречивость определяется компромиссом выбора, когда, выигрывая по одним показателям предпочтительности вариантов, руководитель тушения пожара вынужден уступать по другим показателям. В задаче выбора маршрутов движения противоречивость выбора определяется следующим:

- при выборе кратчайшего маршрута движения возникают ситуации, когда на данном маршруте существуют наихудшие условия видимости. Поэтому выбор кратчайшего маршрута движения не во всех случаях обеспечивает минимальное время прибытия пожарных к месту тушения пожара внутри здания;

- работа пожарных внутри здания проводится с использованием дыхательных аппаратов, поэтому пожарные ограничены по времени пребывания в здании и на практике маршрут, обеспечивающий минимальное время прибытия к месту тушения в здании, потребует максимального количества дыхательной смеси, поэтому её запаса на непосредственную работу по тушению пожара может хватить.

Для формализованного описания и решения задачи по выбору маршрутов движения пожарных внутри здания предлагается воспользоваться теорией многокритериальной оптимизации [5]. В многокритериальном методе возможны две постановки задачи: ранжирование маршрутов движения в порядке предпочтительности и теоретико-множественный анализ маршрутов движения для сужения множества исходных вариантов [6]. При этом, в зависимости от вида и технической оснащённости информационной компоненты системы поддержки управления, может найти применение и задача ранжирования, и задача теоретико-множественного анализа. Поэтому предлагается разработка комбинированной многоуровневой процедуры многокритериального анализа маршрутов движения, которую в дальнейшем будем именовать методом, а также его программной реализации для внедрения в систему поддержки управления [7].

1. Формальная постановка задачи

Многокритериальный метод принятия решений включает в себя [6]:

- множество вариантов $x_i \in X$, $i = 1, 2, \dots, n$, $n \geq 2$;
- множество компонент векторного критерия $f_i \in F$, $s = 1, 2, \dots, m$, $m \geq 2$;
- множество векторных оценок вариантов

$$F(X) = f_1(X) \times f_2(X) \times \dots \times f_m(X), \quad (1.1)$$

где $f_i(X)$ – множество значений i -й компоненты векторного критерия, $f(x) \rightarrow \max$;

$F(x_i) = (f_1(x_i), f_2(x_i), \dots, f_m(x_i))$ – векторная оценка варианта x_i .

Функция ранжирования имеет мультипликативный вид:

$$\Phi(x) = \prod_{i=1}^3 f_i^{\gamma_i}(x), \quad (1.2)$$

где f_1 – "вид маршрута" – показатель, учитывающий конструктивное исполнение маршрута $f_1(x) = B_1$, $B_1 = \{1, \dots, 6\}$;

f_2 – "условия видимости" – показатель, определяющий наличие продуктов горения в объёмах зон маршрутов движения – $f_2(x) = B_2$, $B_2 = \{1, \dots, 6\}$;

f_3 – "протяжённость маршрута" – длина траектории движения в здании – $f_3(x) = L^{-1}$, $L = \{1, \dots, 30\}$;

γ_i – коэффициенты важности критериев.

Выбор мультипликативного вида функции ранжирования основывается на анализе продолжительности движения пожарных внутри здания:

$$\tau = \frac{L}{VK_1K_2}, \text{ мин.}, \quad (1.3)$$

где L – протяжённость маршрута, м;

V – скорость движения, м·мин.⁻¹;

K_1 и K_2 – коэффициенты снижения скорости в зависимости от нагрузки и условий видимости на маршрутах движения.

Значения коэффициентов K_1 и K_2 рассчитываются по формуле

$$K_i = C_i \cdot B_i^{\gamma_i}, \quad i = 1, 2, \quad (1.4)$$

где B_i – бальная шкала зависимости скорости движения по участку маршрута;

C_i и γ_i – эмпирические константы.

При многокритериальном анализе маршруты могут состоять из нескольких участков, в этом случае векторные оценки определяются по формулам:

$$B_{jo} = \left[\frac{L_o}{\sum_{i=1, \dots, k} \frac{L_i}{B_{ji}^{\gamma_j}}} \right]^{1/\gamma_j}, \quad (1.5)$$

где $j = 1, 2$ – номера критериев;

$L_o = \sum_{i=1, 2, \dots, k} L_i$, k – количество участков в маршруте движения.

2. Метод многокритериального выбора маршрутов движения

Исходными данными для реализации метода являются:

- множество вариантов $X = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_n\}$, $i = 1, 2, \dots, n$;
- векторный критерий $F = \{f_1, \dots, f_i, \dots, f_m\}$, $i = 1, 2, \dots, m$;
- весовые коэффициенты $Y = \{\gamma_1, \dots, \gamma_i, \dots, \gamma_m\}$.

В задаче необходимо построить структуру множества вариантов.

Этап 1. Нормализация. На данном этапе метода нормируются значения каждой из компонент векторного критерия по формуле:

$$q_i = f_i / \text{Max } f_i(X), \quad (2.1)$$

где q_i – нормированный критерий f_i ;

$\text{Max } f_i(X)$ – максимальное значение критерия f_i на множестве вариантов X .

Коэффициенты важности ω_i нормируются по формуле:

$$\omega_i = \gamma_i / Y, \quad Y = \sum_{k=1, 2, 3} \gamma_k. \quad (2.2)$$

Формируется нормализованная задача многокритериального выбора:

- множество вариантов $X = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_n\}$, $i = 1, 2, \dots, n$;
- нормированный векторный критерий $Q = \{q_1, \dots, q_i, \dots, q_m\}$, $i = 1, 2, \dots, m$.

- нормированные весовые коэффициенты $W = \{w_1, \dots, w_i, \dots, w_m\}$.

Этап 2. Ранжирование. Данный этап метода предусматривает определение для каждого варианта $x_i \in X$ рейтинга $R = \{1, \dots, i, \dots, n\}$, $R \in Z_+$, необходимого для упорядочивания (ранжирования) вариантов в порядке предпочтительности. Для этого в задаче, помимо множества X , вводится равномощное множество R . Среди всех значений функции Φ на множестве X выбирается максимальное значение, которому присваивается значение $R_1 = 1$. Вариант x_k и значение рейтинга R_1 удаляются соответственно из множества X и множества R . Далее проверяется условие

$$X \setminus x_k = \emptyset. \quad (2.3)$$

Если условие (2.3) выполняется, то работа алгоритма заканчивается, если же нет, то выбирается максимальное из оставшихся значение функции Φ на множестве $X \setminus x_k$ и ему присваивается значение $R_2 = 2$ и так далее.

Этап 3. Расчёт коэффициентов относительной важности. Производится определение коэффициентов относительной важности критериев θ_i . Для этого из компонент Q выбирается компонента с максимальным значением коэффициента ω , данная компонента присваивается группе A , остальные компоненты Q , для которых дополнительно выполняется условие $\omega_j < m^{-1}$, объединяются в группу B .

Для каждой компоненты Q из группы B рассчитывается коэффициент θ_j по формуле

$$\theta_j = 1 - m \cdot \omega_j. \quad (2.4)$$

Этап 4. Модификация векторного критерия. Определяются компоненты нового векторного критерия G . Компоненты G составляются из компонент Q по правилу: для компоненты Q с номером i (группа A) $g_i = q_i$; компоненты Q с номерами j (группа B) рассчитываются по формулам [8]:

$$g_j = q_i^{\theta_j} \cdot q_j^{1-\theta_j}, \quad \forall j \in I \setminus i. \quad (2.5)$$

Этап 5. Построение множества точек максимума. На данном этапе среди векторных оценок $G(X)$ выбирается подмножество парето-оптимальных векторных оценок $P_G(X)$ – точек максимума многопараметрической функции G . Для этого используется алгоритм парных сравнений векторных оценок вариантов, предусматривающий вычитание из векторной оценки с номером " k " векторной оценки с номером " $k + 1$ ", то есть

$$\Delta_{k,k+1} = \{\Delta_1 = g_1(x_k) - g_1(x_{k+1}), \dots, \Delta_p = g_p(x_k) - g_p(x_{k+1})\}. \quad (2.6)$$

Если хотя бы один элемент из множества $\Delta_{k,k+1}$ имеет положительное значение, то вариант с номером k является точкой максимума и содержится во множестве Парето, в противном случае вариант с номером k из множества Парето удаляется.

Этап 6. Построение структуры множества альтернатив. Для построения структуры выбранных вариантов используется свойство исходных вариантов, теоретически обоснованное в работе [6], определяемое последовательными включениями:

$$C(X) \subset P_G(X) \subset P_F(X) \subset X, \quad (2.7)$$

где X – исходное множество вариантов в многокритериальной задаче;

$C(X)$ – множество выбранных вариантов;

$P_F(X)$ – множество парето-оптимальных вариантов, построенное на множестве X с использованием исходного векторного критерия $F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$;

$P_G(X)$ – множество парето-оптимальных вариантов, построенное на множестве X с использованием нового векторного критерия $G = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}$.

Тогда в задаче **наилучшими** будут считаться варианты, принадлежащие множеству $D_0 = P_G(X)$, **эффективными (приемлемыми)** – $D_1 = P_F(X) / P_G(X)$ и **неэффективными (неприемлемыми)** – оставшиеся варианты из множества $D_2 = X / (P_F(X))$.

Для графического анализа векторных оценок вариантов разработан способ визуализации векторной оценки варианта в виде лепестковой диаграммы, в которой оси совпадают со шкалами критериев выбора, а векторная оценка представляется в виде выпуклого многогранника, в котором вершины – это локальные оценки по критериям (пример визуализации трёхмерной векторной оценки представлен на рис. 2.1. а).

При парных сравнениях, если грани двух многогранников имеют пересечения (рис. 2.1. б)), то соответствующие им векторные оценки являются парето-оптимальными; если пересечений нет (рис. 2.1. в)), то это значит, что векторная оценка, которой соответствует многогранник с большей площадью (x_4 рис. 2.1. в)), доминирует векторную оценку с соответствующим многогранником меньшей площади (x_1 рис. 2.1. в)).

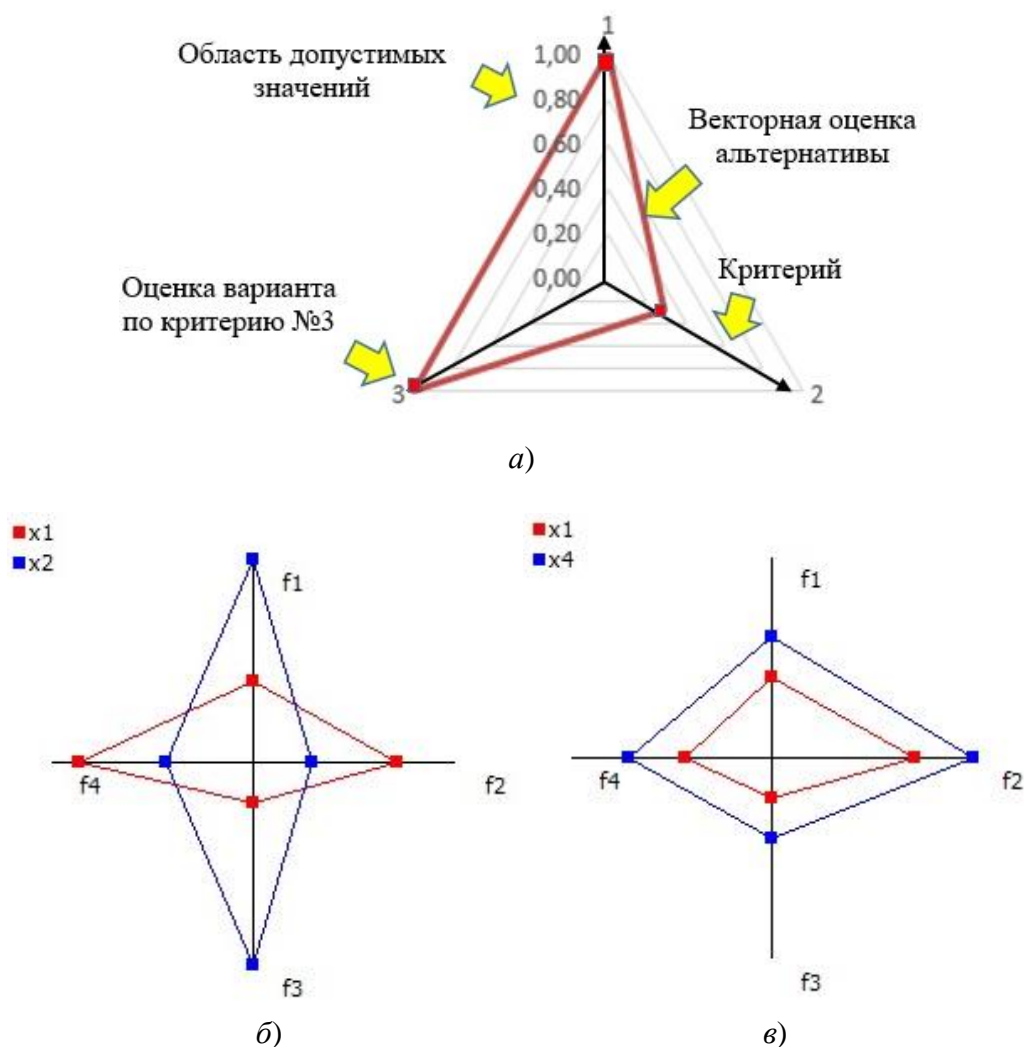
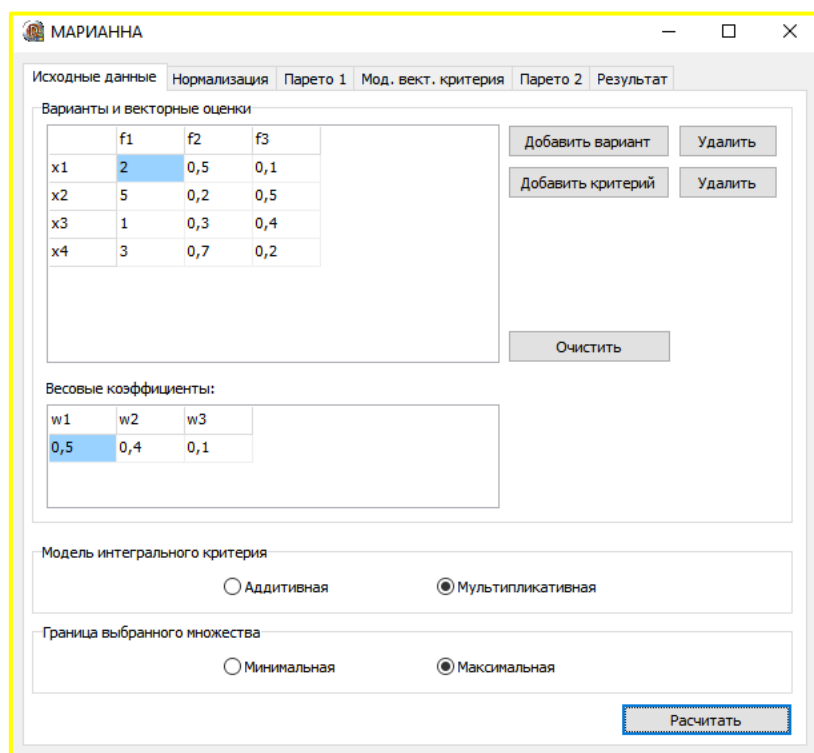


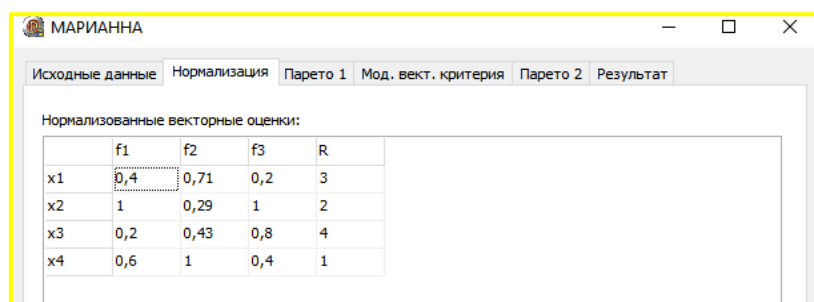
Рис. 2.1. Визуализация парных сравнений векторных оценок альтернатив

3. Программная реализация метода

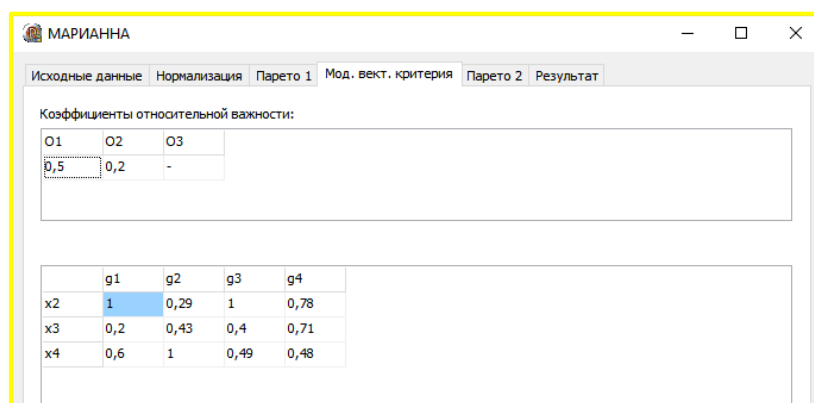
Для применения метода в качестве теоретической основы для систем поддержки управления разработана компьютерная программа реализация метода (рис. 3.1, 3.2).



а)

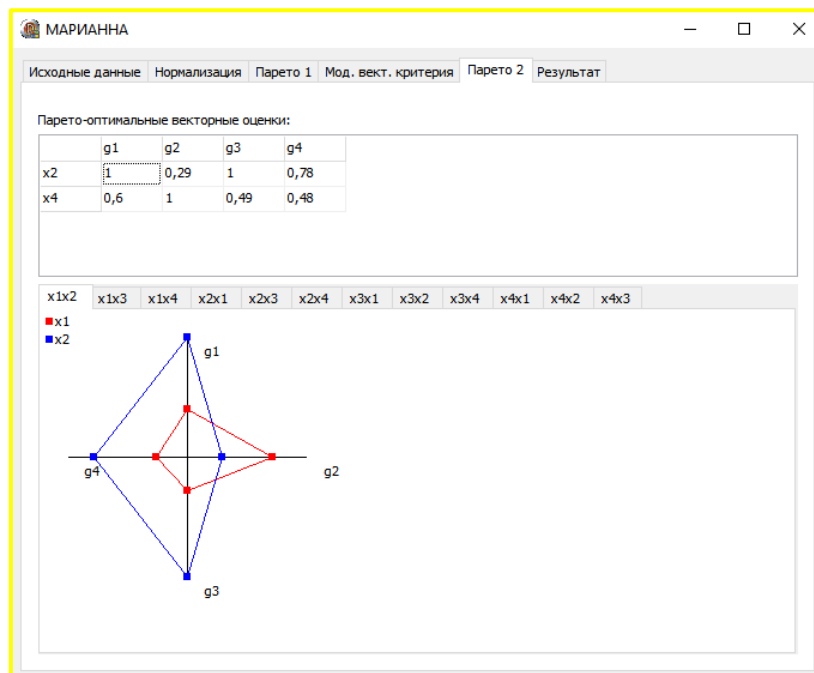


б)

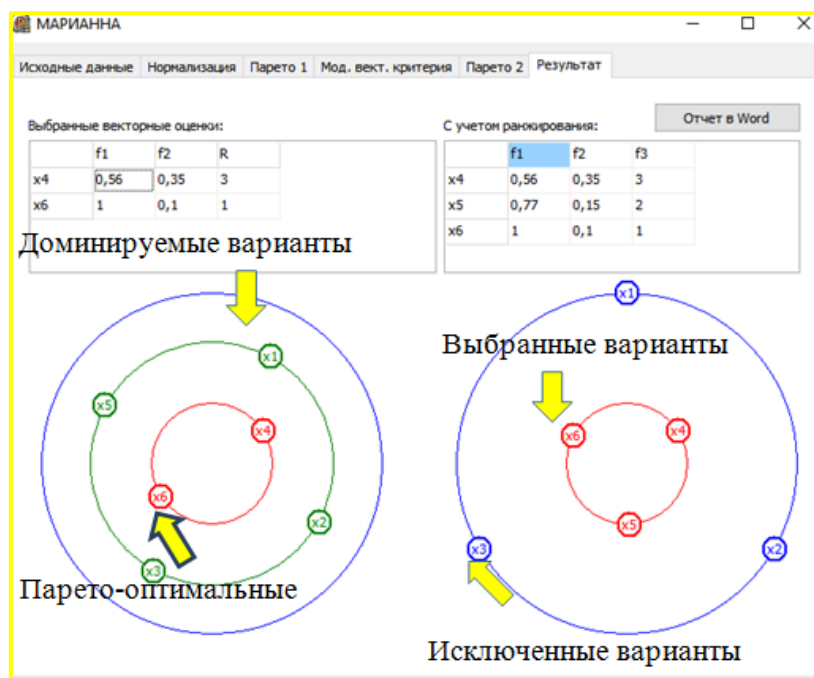


в)

Рис. 3.1. Графический интерфейс программного средства МАРИАННА



з)



д)

Рис. 3.2. Графический интерфейс программного средства МАРИАННА

Блок ввода данных и блок выбора задач позволяют произвести ввод в программу множества векторных оценок (рис. 3.1. а)). Блок нормализация векторных оценок и блок ранжирования предусматривают реализацию процедур этапов 1 и 2 метода (рис. 3.1. б)). Блок расчёта информации об относительной важности и блок модификации векторного критерия реализуют выбранный способ деления критериев по группам, расчёт информации об относительной важности критериев, заданной набором коэффициентов относительной важности

сти. В свою очередь, в блоке производится модификация векторного критерия с учётом коэффициентов важности (рис. 3.1. в)). Блок построения множества Парето реализует процедуры парных сравнений вариантов с целью построения точек максимума многокритериальной функции, характеризующей векторный критерий (рис. 3.1. г)). Блок построения множества выбранных вариантов предназначен для построения и визуализации структуры множества выбранных вариантов с учётом ранжирования (рис. 3.1. д)).

Заключение

Предложенная многокритериальная постановка задачи выбора маршрутов движения пожарных к месту тушения пожара внутри здания позволяет:

- разработать систему поддержки управления для повышения оперативности и обоснованности принимаемых решений;
- произвести формальное описание проблемных ситуаций при тушении пожара в зданиях для накопления базы знаний с последующим её использованием в системах поддержки принятия решений;
- развивать задачу выбора маршрутов движения путём учёта увеличения количества параметров, влияющих на процесс движения пожарных внутри здания: в этом случае обеспечивается повышение размерности многокритериальной задачи, что учитывается применением процедур теоретико-множественного анализа вариантов.

Полученные результаты могут быть использованы также для решения задач, аналогичных задачам по тушению пожаров, например, при ликвидации чрезвычайных ситуаций в зданиях потенциально опасных и критически важных объектов [9].

Литература

1. **Теребнев В.В., Семенов А.О., Тараканов Д.В.** Теоретические основы принятия решений при управлении силами и средствами на пожаре // Пожаровзрывобезопасность, 2012. Т. 21. № 10. С. 14-17.
2. **Теребнев В.В., Семенов А.О., Смирнов В.А., Тараканов Д.В.** Анализ и поддержка решений при тушении крупных пожаров // Пожаровзрывобезопасность. 2010. № 9. С. 51-58.
3. **Станкевич Т.С.** Определение оптимального пути спасения людей из горящего здания // Технологии техносферной безопасности. Вып. 5 (51). 2013. С. 56-64. <http://ipb.mos.ru/ttb>.
4. **Теребнев В.В., Грачев В.А., Тараканов Д.В.** Методика принятия управленческих решений при тушении пожара в условиях многокритериальности // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. № 4. М.: Академия ГПС МЧС России, 2009. С. 35-43.
5. **Семенов А.О., Тараканов Д.В., Лабутин А.Н.** Методика многокритериальной оценки эффективности тушения пожаров на объектах химической промышленности // Современные наукоемкие технологии, региональное приложение. №.3. 2012. С. 101-104.
6. **Ногин В.Д.** Проблема сужения множества Парето: подходы к решению // Искусственный интеллект и принятие решений. 2008. № 1. С. 98-112.
7. **Тараканов Д.В.** Метод модификации векторного критерия в системе поддержки принятия решения при тушении крупного пожара // Технологии техносферной безопасности. 2010. № 2. <http://ipb.mos.ru/ttb>.
8. **Тараканов Д.В.** Функция выбора наилучшего решения при двух критериях // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2010. № 1. С. 24-27.
9. **Семенов А.О., Лабутин А.Н., Тараканов Д.В.** Методика определения показателей предпочтительности вариантов действий по ликвидации чрезвычайных ситуаций на потенциально опасных объектах // Вестник Ивановского энергетического университета. 2012. № 3. С. 51-54.